

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Au/CdTe ve Ag/CdTe EKLEMLERİN YAPISAL ve
OPTO-ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ**

Yüksek Fizikçi Murat ÇALIŞKAN

**F.B.E. Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 07 Temmuz 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tayyar CAFEROV (YTÜ)

**Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emel ÇINGİ (YTÜ)
Prof. Dr. Fatma TEPEHAN (İTÜ)
Prof. Dr. Durul ÖREN (YTÜ)
Prof. Dr. Nurfer GÜNGÖR(İTÜ)**

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Metal/Yarıiletken Kontaklar	2
1.2.1 Schottky Kontak	3
1.2.2 Omik Kontak	4
1.3 Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları	6
1.3.1 Difüzyon Kuralları	8
1.4 CdTe Filmlerini Üretim Yöntemleri	12
1.4.1 Yakın Mesafeli Süblimleşme	12
1.4.2 Elektrokimyasal Kaplama	12
1.4.3 Kimyasal Püskürtme	14
1.4.4 Elek Kaplama (Screen Printing)	14
1.5 CdTe'nin Yapısal Özellikleri	14
1.5.1 Kübik Çinko Sülfür Yapısı	17
1.6 CdTe'nin Elektriksel Özellikleri	19
1.7 CdTe'nin Optik ve Fotoelektrik Spektrumları	21
1.8 Katkılarının ve Örgü Kusurlarının CdTe'nin Elektrik Özelliklerine Etkisi	25
1.9 Metal/CdTe Eklemlerin Elektriksel Karakteristikleri	28
1.10 Tavlamanın Ag,Au/CdTe Eklemlerin Özelliklerine Etkisi	30
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
2.1 CdTe Filmlerin CSS Yöntemleri ile Hazırlanması	31
2.2 CdTe Filmlerin İletkenlik Tipi Ölçümleri	31
2.2.1 CdTe Filmlerin Öz direnci ve Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonu Ölçümü	32
2.3 CdTe Filmlerin ve Ag(Au)/CdTe Eklemlerin XRD Yöntemi ile Analizi	35
2.4 CdTe'nin Kompozisyonu ve Katkı Atomlarının Konsantrasyon Dağılımının XRF Yöntemiyle Analizi	37

2.5	Katkıların CdTe Filmlerinde Çözünürlük Analizi.....	37
2.6	Katkıların Enerji Seviyelerinin İletkenlik-Sıcaklık Ölçümlerinden Belirlenmesi.....	38
2.7	CdTe Filmlerin Yasak Bant Genişliğinin ve Katkılarının Enerji Seviyelerinin Optik Geçirgenlik Spektrumlarından Belirlenmesi	41
2.8	Metal/CdTe Eklemlerin I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi.....	43
2.9	Metal/CdTe Eklemlerin C-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi.....	45
2.10	CdTe Filmlere Omik Kontakların Yapılması	47
2.11	CdTe Filmlerin Spektral Fotoiletkenliğinin Belirlenmesi	49
3.	BULGULAR	50
3.1	CdTe Filmlerin Özellikleri	50
3.1.1	CdTe Filmlerin Yapısal Özellikleri	50
3.1.2	Optik Özellikleri	51
3.1.3	Elektrik Özellikleri	53
3.2	Au Difüzyonunun CdTe Filmin Özelliklerine Etkisi	55
3.2.1	Au ile Katkılanmış CdTe Filmlerin XRD Karakteristikleri	55
3.2.2	Au'nun CdTe Filmlerinde Difüzyonu	57
3.2.3	Au Katkılı CdTe Filmlerin Elektriksel Karakteristikleri.....	61
3.2.4	Katkısız ve Au katkılı CdTe Filmlerin İletkenlik-Sıcaklık Eğrisi	64
3.2.5	Au ile Katkılanmış CdTe Filmlerin Foto İletkenlik ve Optik Absorpsiyon Spektrumları	66
3.3	Au/pCdTe Yapının I-V Karakteristikleri.....	68
3.4	Ag Difüzyonunun CdTe İnce Filmlerin Özelliklerine Etkisi	70
3.4.1	Ag ile Katkılanmış CdTe Filmlerin XRD Karakteristikleri	70
3.4.2	CdTe Filme Ag Difüzyonunda Ag ₂ Te Fazının Oluşumu	71
3.4.3	Ag'nin CdTe Filmlerinde Difüzyonu	75
3.4.4	Gümüşün nCdTe Filmlerde Işıkla Uyarılmış Difüzyonu	79
3.5	Ag Katkılı CdTe Filmlerin Elektriksel Karakteristikleri.....	81
3.5.1	Ag ile Katkılanmış CdTe Filmin İletkenlik-Sıcaklık Eğrisi	83
3.5.2	Ag ile katkılanmış CdTe Filmin Foto-iletkenlik ve Optik Absorpsiyon Spektrumları	84
3.5.3	Ag/pCdTe Yapının Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri	87
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	90
	KAYNAKLAR.....	96
	ÖZGEÇMİŞ.....	100

SİMGE LİSTESİ

a, b, c	Örgü Parametresi
A, S	Alan
A [*]	Richardson Sabiti
d	Kalınlık
B	Magnetik Alan
β	İdeallik katsayısı
C	Kapasite
C _p	Isı kapasitesi
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektron Yüğü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donör Enerji Seviyesi
E _g	Yasak Bant Genişliğı
E _H	Hall Alanının Şiddeti
$\vec{F}$	Kuvvet
h	Planck Sabiti (6.62x10 ⁻³⁴ J.s), Yükseklik
I	Akım, Işık Şiddeti
I _s	Doyma Akımı
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
J	Akım Yoğunluğu
J _{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
J _f	İleri Yön Akım Yoğunluğu
m [*]	Etkin Kütle
$\vec{g}$	Hız
V	Gerilim, Boşluk (Vakansiyon)
V _H	Hall Gerilimi
V _{oc}	Açık Devre Gerilimi
α	Soğurma Katsayısı
ϵ	Dielektrik Sabiti
λ	Dalga Boyu
ρ	Özdirenç, Yoğunluk
μ	Mobilite

ν	Frekans
χ	Elektron Alınganlığı
ϕ	Termodinamik Çıkış İşi
ϕ_b	Bariyer Yüksekliği
φ	Kontak Potansiyeli
k	Dalga Vektörü, Boltzman Sabiti
N	Atomların Konsantrasyonu
n	Kırılma İndisi, Elektron Konsantrasyonu
p	Boşluk Konsantrasyonu
q	Yük
R	Yansıma Katsayısı, Direnç
R_H	Hall Sabiti
σ	İletkenlik
τ	Yaşam Ömrü
t	Zaman
T	Optik Geçirgenlik, Sıcaklık
K	Debye Sıcaklığı

KISALTMA LİSTESİ

CSS	Close Space Sublimation
DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy
ED	Electro Deposition
k.b.	keyfi birim
TEMK	Termal Elektro-Motor Kuvvet
PICTS	Photo-Induced Current Transient Spectroscopy
PVD	Physical Vapor Deposition
SPD	Screen Print Deposition
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray flouresan
YMS	Yakın Mesafeli Süblimleşme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 $\phi_m > \phi_s$ durumunda a) Metal-n-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu kontak. (Caferov, 1998).....	3
Şekil 1.2 $\phi_m < \phi_s$ durumunda a) Metal-p-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu kontak. (Caferov, 1998).....	4
Şekil 1.3 $\phi_m < \phi_s$ durumunda a) Metal-n-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu olmayan kontak. (Caferov, 1998).....	5
Şekil 1.4 $\phi_m > \phi_s$ durumunda a) Metal-p-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu olmayan kontak (Caferov, 1998). ..	5
Şekil 1.5 Kristalde atomlar arası potansiyel engellerinin gösterimi (W potansiyel engelinin yüksekliği, a örgü mesafesi). (Caferov, 1998).....	6
Şekil 1.6 Atomların difüzyon mekanizmaları: (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs’de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998).....	7
Şekil 1.7 (1) Boşluk, (2) ara yer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı (Caferov, 1998)	9
Şekil 1.8 Sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyonla atomların, örnek kalınlığı ile konsantrasyonun değişimi (Caferov, 1998).	10
Şekil 1.9 Son derece ince filmde difüzyonda atomların kalınlıkla konsantrasyon dağılımları (Caferov 1998).....	11
Şekil 1.10 İnce film CdTe üretim yöntemleri. a) yakın mesafeli süblimleşme, b) buhar taşınalı kaplama, c) Fiziksel buhar kaplama, d) Sputter kaplama, e) Elektrokimyasal kaplama, f) metal organik kimyasal buhar kaplama, g) kimyasal püskürtme, h) Elek kaplama (Luque, 2003) ve (Roussillon, 2004)...	13
Şekil 1.11 Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd, (b) Te.	15
Şekil 1.12 CdTe nin faz diyagramı. Koyu kareler Kulwicki, açık daireler Lorentz , koyu daireler Steininger, ve açık üçgenler Brebrick’e ait sonuçlardır (F. Rei, 1994).	16
Şekil 1.13 CdTe bileşiğinin kübik çinko sülfid yapısı (Zanio, 1978).	18
Şekil 1.14 CdTe hekzagonal yapısı (Ongül, 2004).....	19
Şekil 1.15 Direkt band geçişi (Pankove, 1971).	22
Şekil 1.16 İndirekt bant geçişi (Pankove, 1971).....	23
Şekil 1.17 Farklı kalınlıklardaki ▲ 0.57, ● 0.734, × 0.895µm elektro kaplama ile elde edilen CdTe örneklerin dalga boyuna bağlı kırılma indisi dispersiyon grafiği (Mathew, 1999).....	24

Şekil 2.1 Cam altlık üzerine ince film CdTe kaplamak için kullanılan yakın süblimleşme yöntemi.	31
Şekil 2.2 Termal EMK yöntemi ile (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov 1998).	32
Şekil 2.3 Van der Pauw metodu ile öz direnç ölçümlerinde serbest plaka.....	33
Şekil 2.4 Düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 oranına karşı grafiği (J. G. Webster, 1999).....	34
Şekil 2.5 Hall ölçümü için kontakların konumu.....	34
Şekil 2.6 XRD difraktometre geometrisi (Caferov, 1998).	36
Şekil 2.7 1µm çaplı elmas parlatici ile CdTe ince filmde tabakaların ayrılması.....	37
Şekil 2.8 Katkılı yarıiletkende yük taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklığa bağlı değişimi (Caferov, 1998).	38
Şekil 2.9 İki-probu yöntemle öz direnç ölçüm devresi (Caferov, 1998).....	39
Şekil 2.10 İletkenlik sıcaklık ölçümünde kullanılan sistem	40
Şekil 2.11 Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).	41
Şekil 2.12 Akım gerilim ölçümleri için kullanılan elektrik devresi	43
Şekil 2.13 Doğru akım yoğunluğunun gerilimle değişim grafiği.....	44
Şekil 2.14 Schottky diyodun kapasitans-ters gerilim karakteristiği (Caferov, 2000).....	46
Şekil 2.15 Omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri. a) küçük doğrultmaya sahip omik kontak, b) direnci gerilime bağlı omik kontak (Caferov, 1998).	48
Şekil 2.16 CdTe ince filmlerde fotoiletkenlik ölçümünde kullanılan düzenek.	49
Şekil 3.1 CSS ile elde edilmiş 500°C de 10dak. tavllanmış CdTe filmin X-ışını kırınım deseni.....	50
Şekil 3.2 Temiz CdTe örneğin optik geçirgenlik spektrumu.....	52
Şekil 3.3 Temiz CdTe örneğin absorpsiyon spektrumu.	52
Şekil 3.4 p-tip CdTe ye (1) GaIn , (2) Cu, (3) Ag ve (4) Al, metalleri ile yapılan kontakların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.	53
Şekil 3.5 n-tip CdTe ye (1) GaIn , (2) Cu, (3) Ag ve (4) Al, metalleri ile yapılan kontakların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.	54
Şekil 3.6 500°C’de 10dak. tavllanmış Au/CdTe yapının XRD deseni.....	55
Şekil 3.7 Au-Te elementlerine ait faz diyagramı. (Baker, 1999)	57
Şekil 3.8 500°C de 5 dakika süre ile Au difüzyon yapılmış CdTe yapıda Au metaline ait XRF pikinin kalınlıkla değişimi (parlatma sırası 1, 2, 3, 4 ve 5 şeklindedir)(Au, L-(α1) (9,713keV), Au, L-(β1) (11,440keV))	58
Şekil 3.9 (1) 400, (2) 450, (3) 500, (4) 550 °C sıcaklıklarında tavlama ile Au metalinin CdTe	

filme difüzyonu sonrası Au konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi.....	60
Şekil 3.10 Au'nun CdTe filmde difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.	61
Şekil 3.11 Au filmin kalınlığının CdTe öz direncine etkisi.....	62
Şekil 3.12 Au filmin kalınlığının CdTe yük taşıyıcı konsantrasyonuna etkisi.....	63
Şekil 3.13 Katkısız CdTe ince film yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi($\sigma \cdot 10^3/T$). 64	
Şekil 3.14 Au katkılı CdTe ince film yarıiletkenin ($\sigma \cdot 10^3/T$) eğrisi. (1) eğrinin eğimi yasak enerji aralığını, 2 numaralı eğrinin eğimi katkı seviyesini göstermektedir.	65
Şekil 3.15 450°C'de 1 saat tavlansın Au ile katkılanmış CdTe filmin foto-iletkenlik spektrumu.....	66
Şekil 3.16 450°C' de 1 saat tavlansın Au ile katkılanmış CdTe filmin foton dalga boyuna bağılı absorpsiyon (spektrumu). (1) CdTe yasak enerji aralığını, (2) katkı seviyesini vermektedir.	67
Şekil 3.17 Au katkısının (p)CdTe bant diyagramındaki yeri.....	68
Şekil 3.18 Ag/pCdTe eklem (1) Aydınlık ve (2) karanlık akım-gerilim (I-V) grafiğı.	69
Şekil 3.19 Au/pCdTe eklem bant diyagramı.	70
Şekil 3.20 500°C'de 10 dak. tavlansın Ag/CdTe yapının XRD deseni.....	70
Şekil 3.21 Yakın mesafeli süblimleşme ile elde edilmiş CdTe ince filmin X-ışını kırınım deseni.	72
Şekil 3.22 Ag katkılı CdTe yarıiletkenin X-ışını kırınım deseni ve Ag ₂ Te fazı.	73
Şekil 3.23 Ag katkılı n-CdTe örneğinin iletkenlik sıcaklık eğrisi.	73
Şekil 3.24 Ag-Te elementlerine ait faz diyagramı. (Baker, 1999)	74
Şekil 3.25 (1) 350, (2) 400, (3) 450, (4) 500 °C sıcaklıklarında tavlama ile Ag metalinin CdTe filme difüzyonu sonrası Ag konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi.....	76
Şekil 3.26 Ag'nin CdTe filmlerinde difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	77
Şekil 3.27 Ag metalinin CdTe filmde çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi.....	78
Şekil 3.28 320°C sabit sıcaklıkta (1) termal ve (2) foto difüzyon etkisi ile CdTe (Ag) örneğinin direncinin tavlama zamanı ile değişimi	79
Şekil 3.29 Ag nin CdTe filmde etkin (1) termal ve (2) foto difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	80
Şekil 3.30 Ag filmin kalınlığının CdTe öz direncine etkisi.....	82
Şekil 3.31 Ag filmin kalınlığının CdTe yük taşıyıcı konsantrasyonuna etkisi.....	82
Şekil 3.32 Ag katkılı CdTe ince film yarıiletkenin ($\sigma \cdot 10^3/T$) eğrisi. (1) eğrinin eğimi yasak enerji aralığını, 2 numaralı eğrinin eğimi katkı seviyesini göstermektedir.	84
Şekil 3.33 450°C'de 1 saat tavlansın Ag ile katkılanmış CdTe filmin fotoiletkenlik	

spektrumu.....	85
Şekil 3.34 450°C’de 1 saat tavlanarak Ag ile katkılanmış CdTe filmin absorpsiyon spektrumu.....	86
Şekil 3.35 Ag/CdTe eklemnin karanlıkdaki akım- gerilim karakteristiği.	87
Şekil 3.36 Ag/p-CdTe eklemnin kapasitans-(ters)gerilim grafiğı.	88
Şekil 3.37 Ag/pCdTe eklemnin bant diyagramı. Bariyer yüksekliğı 0,66eV dur.	89

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Cd ve Te elementlerinin Elektronik ve yapısal özellikleri	15
Çizelge 1.2 CdTe yarıiletkenine ait bazı parametreler.	20
Çizelge 1.3 Farklı şartlarda tavlanan CdTe örneklerine ait parametreler (Mathew, 1999	25
Çizelge 1.4 Çeşitli katkı ve kusurların CdTe nin bant yapısındaki enerji seviyesi (Mathew, 2003)	27
Çizelge 1.5 Çeşitli metallerin çıkış işleri (Lide, 2005).....	28
Çizelge 3.1 Temiz CdTe yapısının XRD desenine ait piklerin parametreleri.	51
Çizelge 3.2 Cu, Ag, Al ve GaIn metallerinin p ve n tip CdTe kontak dirençleri.	54
Çizelge 3.3 Au/CdTe yapının XRD desenine ait piklerin parametreleri.	56
Çizelge 3.4 Hazırlanan Au/CdTe örneklerin kalınlıkları ve tavlama sıcaklıkları	57
Çizelge 3.5 Au L-Alfa pikini örnek kalınlığı ile değişimi.....	59
Çizelge 3.6 Au'nun CdTe de farklı sıcaklıklarda difüzyon katsayıları	60
Çizelge 3.7 Au kalınlığının CdTe filmin elektriksel özelliklerine etkisi.....	63
Çizelge 3.8 Ag/CdTe yapının XRD desenine ait piklerin parametreleri.....	71
Çizelge 3.9 Hazırlanan Au/CdTe örneklerin kalınlıkları ve tavlama sıcaklıkları	75
Çizelge 3.10 Ag K(-Beta1) pikinin kalınlıkla değişimi (Ag-K _{β1})	75
Çizelge 3.11 Ag'nın CdTe de farklı sıcaklıklardaki difüzyon katsayıları.....	77
Çizelge 3.12 Ag kalınlığının CdTe filmin elektriksel özelliklerine etkisi.....	83
Çizelge 4.1 Hekzagonal yapıdaki CdTe filmin örgü parametreleri.....	90
Çizelge 4.2 Kübik yapıdaki CdTe filmin örgü parametreleri.....	91

ÖNSÖZ

Uzun soluklu bir çalışma sonucu ortaya çıkan bu tezin belirlenmesi ve hazırlanması sürecinde bilgisi ve deneyimini benimle paylaşan, sabır ve özveri ile yardım eden, kendisinden çok şey öğrendiğim danışman hocam Sayın Prof.Dr. Tayyar CAFEROV'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni her zaman destekleyen ve bana uygun çalışma ortamı sağlayan hocalarımdan rektörümüz Sayın Prof.Dr. Durul ÖREN'e, dekanımız Sayın Prof.Dr. Metin SUBAŞI'ya, bölüm başkanımız Sayın Prof.Dr. Emel ÇINGI'ya çok teşekkür ederim.

Yardımlarını ve desteklerini her zaman hissettiğim arkadaşlarım Yard.Doc.Dr. S.Serkis YEŞİLKAYA, Araş.Gör. Fatih Ongül, Araş.Gör. Süreyya AYDIN ve Araş.Gör. Ayşegül Çelik'e çok teşekkür ederim.

Eğitimim süresince bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her zaman güvenen aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Omik kontak ya da Schottky diyot amacı ile üretilen metal-yarıiletken yapıların kararlılığı eklemi oluşturan komponentlerin kararlılığı ve birbirleri ile etkileşmelerine bağlıdır. Bu amaçla CdTe yarıiletkeninde omik ya da Schottky eklem olarak kullanılan Au, Ag metallerinin CdTe’de difüzyonu, Au ve Ag katkılı CdTe filmlerin ve Au/CdTe, Ag/CdTe eklemlerin yapısal, optik ve elektrik özellikleri incelendi.

Yakın mesafeli buharlaştırma yöntemi ile elde edilen CdTe filmlerin yapısal özellikleri XRD yöntemi ile araştırıldı. Üretilen filmlerin kübik ve hekzagonal yapıda boyutları ortalama 0,1µm olan polikristal CdTe taneciklerden oluştuğu belirlendi. Cam üzerine yaklaşık 4µm kalınlıkta kaplanan CdTe ince film yarıiletkeninin optik absorpsiyonun spektral değişiminden yasak enerji aralığı 1.5eV olarak belirlendi.

P ve n tip CdTe için elektriksel ölçümlerde kullanılacak omik kontak metali olarak $9,6 \times 10^6$ ohm.cm² lik kontak direnci ile GaIn sıvı metali belirlendi.

Elektron demeti kaplama yöntemi ile CdTe üzerine kaplanan Au metalinin 350-550°C sıcaklıkları arasında CdTe ye difüzyonu, XRF yöntemi ile belirlendi. Buradan difüzyon çarpanı $4,4 \times 10^{-7}$ cm²/s ve aktivasyon enerjisi 0,54eV olarak belirlendi. Au difüzyonunun CdTe nin yapısına etkisi XRD yöntemi ile araştırıldı ve difüzyon sonrası filmde kübik ve hekzagonal yapıda polikristal CdTe taneciklerin oluştuğu belirlendi. Termal difüzyon ile elde edilen Au katkısı p tip CdTe yarıiletkenin yasak enerji bandında akseptör özellikte, valans banttıan yukarıda 0,2eV luk enejji seviyesine sahip olduğu belirlendi.

Au/pCdTe eklemın elektriksel özellikleri incelendi ve eklemın omik özellik gösterdiği belirlendi.

Elektron demeti kaplama yöntemi ile CdTe üzerine kaplanan Ag metalinin 350-450°C sıcaklıkları arasında CdTe ye difüzyonu, XRF yöntemi ile belirlendi. Buradan elde edilen difüzyon çarpanı 4×10^{-7} cm²/s ve difüzyon aktivasyon enerjisi 0,72eV olarak belirlendi. Kübik CdTe filmde Ag difüzyonu sonrası XRD ölçümleri sonucu Ag₂Te fazının oluştuğu belirlendi. Bununla birlikte iletkenliğin sıcaklıkla değişimi ölçümünden Ag₂Te fazının oluşma sıcaklığında (145°C) Ag katkılı CdTe filmin iletkenliğinin değiştiği belirlendi. Ag ile katkılanan CdTe filminde optik yöntem ve iletkenlik sıcaklık ölçümlerinden yasak bantta katkı nedeni ile valans banttıan yukarıda 0.09eV luk katkı seviyesinin oluştuğu belirlendi.

280-420°C sıcaklıkları arasında Ag metalinin Ag/CdTe yapıda ışııkla uyarılmış difüzyonu incelendi. Ag nin ışııkla uyarılmış difüzyon katsayısı termal difüzyon katsayısından 4 kat daha büyük olduğu tespit edildi.

Ag/pCdTe eklemın elektriksel karakteristikleri incelendi ve Schottky diyot karakterinde olduğu belirlendi. Akım gerilim ölçümlerinden diyodun engel yüksekliği 0,7-0,8eV olarak, doyma akım yoğunluğu $3,7 \times 10^{-8}$ A/cm², ideallik çarpanı 1,9-10 olarak hesaplandı.

Anahtar Kelimeler : CdTe, Difüzyon, Au/CdTe, Ag/CdTe, Omik Kontak, Schottky Eklem

ABSTRACT

Stability of Metal-Semiconductor Structures which are used as Schottky diode or ohmic contact depends on the stability of its components and interaction between the components. Au and Ag metals are used for Schottky junction or contact material for CdTe thin film based devices. Diffusion of Au and Ag metals into CdTe thin film, structural, electrical and optical properties of Au and Ag doped CdTe thin films and Au/CdTe, Ag/CdTe structures were examined.

CdTe thin films were grown by Close Spaced Sublimation (CSS) onto glass substrate and its structural properties were examined by the x-ray diffraction method. The films have cubic and hexagonal structured polycrystal properties with grain size $0,1\mu\text{m}$. The optical absorption spectra methods showed that calculated band gap of CdTe is $1,5\text{eV}$.

Contact metal studies shown that GaIn is suitable as an ohmic contact with contact resistivity $9,6 \times 10^6 \text{ ohm.cm}^2$ in order to measure electrical properties of CdTe.

Au were evaporated onto the CdTe thin film by electron beam evaporation. Thermal diffusion of Au ($350\text{-}550^\circ\text{C}$) into the CdTe thin film were examined by XRF method. Calculated diffusion coefficient is $4,4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ and diffusion activation energy is $0,54\text{eV}$. The structural effect of diffusion of Au into CdTe film also examined by the x-ray diffraction method. Cubic and hexagonal structured grains were investigated in the film. Conductivity-Temperature, optical absorption spectra and conductivity- photon spectra measurements showed that Au dope has $E_v+0,2 \text{ eV}$ acceptor level in the band gap of p type CdTe.

Electrical properties of Au/pCdTe structure were studied and ohmic properties of the structure were shown.

Ag were evaporated onto the CdTe thin film by electron beam evaporation. Thermal diffusion of Ag ($350\text{-}550^\circ\text{C}$) into the CdTe thin film were examined by XRF method. Calculated diffusion coefficient is $4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ and diffusion activation energy is $0,72\text{eV}$. The structural effect of diffusion of Ag into CdTe film also examined by x-ray diffraction method. Cubic and hexagonal structured grains were investigated in the film. XRD measurements on Ag diffused cubic CdTe films showed the existence of Ag_2Te phase. Also formation of the Ag_2Te phase were observed from the conductivity-temperature measurements. Conductivity-Temperature, optical absorption spectra and conductivity- photon spectra measurements showed that Ag dope has $E_v+0,09 \text{ eV}$ acceptor level in the band gap of p type CdTe.

Photon induced diffusion of Ag into CdTe thin film were studied at the temperatures between $280\text{-}420^\circ\text{C}$. It was shown that photon induced diffusion coefficient is four times higher than thermal diffusion coefficient at the same temperature interval.

Electrical properties of Ag/pCdTe structure were studied and Schottky diode properties were investigated with the barrier height $\Phi_b = 0,7\text{-}0,8\text{eV}$, ideality factor $\beta = 1,9\text{-}10$ and the saturated current density $J_s = 3,7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

Keywords : CdTe, diffusion, Au/CdTe, Ag/CdTe, Ohmic Contact, Schottky Junction.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Dünya üzerinde insan nüfusunun artışı, sanayinin gelişmesi, buna bağlı olarak artan enerji ihtiyacı ve geleneksel enerji kaynağı olarak adlandırılan fosil yakıtlarının bitecek olması insanoğlunu alternatif enerji kaynaklarını arayışa yöneltmiştir. Yeryüzünde kullanılan geleneksel enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynağı olan geleneksel olmayan enerji kaynakları olarak adlandırılan hidroelektrik, nükleer, jeotermal santraller ayrıca deniz dalgası ve rüzgar santralleri enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır fakat bu santraller avantajlarının yanı sıra dezavantajlara sahiptir. Bu kaynaklara ilaveten bitmeyen enerji kaynağı, Güneş enerjisinden faydalanma fikri temiz yenilenebilir ve süreklilik gibi önemli özellikleri nedeni ile yoğun ilgi görmektedir. Bu amaçla kullanılan güneş pilleri güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirmesi nedeni ile önem kazanmıştır. Güneş pilleri arasında da üretiminin kolay ve teknolojisinin ucuz olması nedeni ile ince film güneş pilleri ilgi görmekte ve verimlerinin artırılması yönünde yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Fransız fizikçi Edmund Becquerel'in 1839 yılında yaptığı çalışma ilk güneş pili olarak kabul edilir. Becquerel, elektrolit içine daldırdığı iki metalden birinin üzerine düşürdüğü ışık ile orantılı gerilimin oluştuğunu gözlemledi. 1873 yılında Willoughby selenyumun foto iletkenliğini, 1876 yılında Adams ve Day katı selenyumda fotovoltayik etki gözlemlediler. 1883 de Amerikalı kaşif Charles Fritts, selenyum tabakadan yapılan güneş pilini tarif etti.

1923 yılında Albert Einstein foto elektriğin tarifini yapması nedeni ile Nobel ödülünü aldı. İlk olarak p-n eklem tek kristal germanyum üzerinde büyütüldü. 1954 yılında Bell laboratuvarlarında Pearson, Chapin ve Fuller % 4,5 verimle çalışan silisyum güneş pilini elde ettiler ve birkaç ay sonra %6 verime ulaştılar. 1958 yılında silisyum güneş pillerinin verimi %9 verime ulaşmış ve ilk foto voltaik pillerle beslenen uydu yörüngesine yerleştirilmiş ve bu piller 8 yıl çalışmıştır.

Daha sonraki yıllar çeşitli metal ve yarıiletkenler ve bunların ikili üçlü bileşikleri ile çeşitli yapılarda güneş pilleri yapılmıştır. 1954 yılında Reynold Cu_xS/CdS ince film hetero eklemle %6 verime ulaştı. Bu pilin ince filmden yapılmış bir eklem olması, önemli bir gelişme olarak kayıt edilmiştir. %14 luk verimle Si, Ge ve %25 lik verimle GaAs tek kristal güneş pilleri yapılmış Cu_xS/CdS pillerinde %20 lik verime ulaşılmıştır. Bunlara ilaveten son yıllarda

Cu(InGa)Se₂/CdS ve CdTe/CdS güneş pilleri üzerinde verim arttırıcı yönünde çalışmalar yapılmıştır.

Güneş pilleri homo eklem, hetero eklem ve Schottky eklem olarak üç şekilde yapılmaktadır. Bu eklemler hem bulk yapı hemde ince film yapıda olabilmektedir. İnce film güneş pillerinin daha kolay, ucuz yöntemlerle üretilmesi, esnek yapıya sahip olabilmesi, gibi özellikleri hacimsel (bulk) güneş pillerine üstünlük olarak gösterilir. Bununla birlikte ince film güneş pillerinde verim henüz hacimsel pillerdeki seviyeye ulaşamamıştır. Bu nedenle çeşitli araştırma merkezleri bu konuda yoğun çalışmalar yapmaktadır.

CdTe yarıiletkeni güneş spektrumuna uygun yasak enerji aralığına sahip olması, yüksek optik absorpsiyon katsayısına ve ince film olarak üretiminin kolay olması nedeni ile güneş pili absorplayıcı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu nedenle CdTe üzerinde birçok çalışma yapılmakta ve bu yarı iletkenle yapılan güneş pillerinin verimi arttırılmaya çalışılmaktadır.

Çeşitli amaçlar doğrultusunda üretilen elektronik aletlerin (güneş pilleri, hızlı diyotlar, transistorler v.b.) kararlı çalışmaları, verimi ve performansı bu aletlere yapılan omik yada schottky kontakların kararlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Yukarıda bahsettiğimiz gibi, optimum yasak enerji bandına ve yüksek soğurma katsayısına sahip olan CdTe ince filmleri, güneş pilleri hazırlanması için en uygun malzemedir. CdTe/CdS güneş pillerinde omik kontak malzemesi olarak büyük çıkış işine sahip olan metaller (Au, Ag vs.) kullanılır ve metal/CdTe kontakların rolü güneş pillerin çalışmasında çok önemlidir. Bu tür kontak metalleri, yüksek difüzyon hızlarına göre, CdTe/CdS güneş pillerin üretiminde ve çalışma sürecinde, onların parametrelerinin bozulmasına (degradasyonuna) neden olabilir. Bu çalışmada, CdTe/CdS güneş pillerin hazırlanmasında kullanılan Au ve Ag metallerin termal difüzyonun ve fotodifüzyonun CdTe filmlerin yapısal, elektrik, fotoelektrik ve optik özelliklerine etkisi incelendi. Ayrıca, Ag/CdTe ve Au/CdTe Schottky eklemlerin elektriksel karakteristikleri de araştırıldı.

1.2 Metal/Yarıiletken Kontaklar

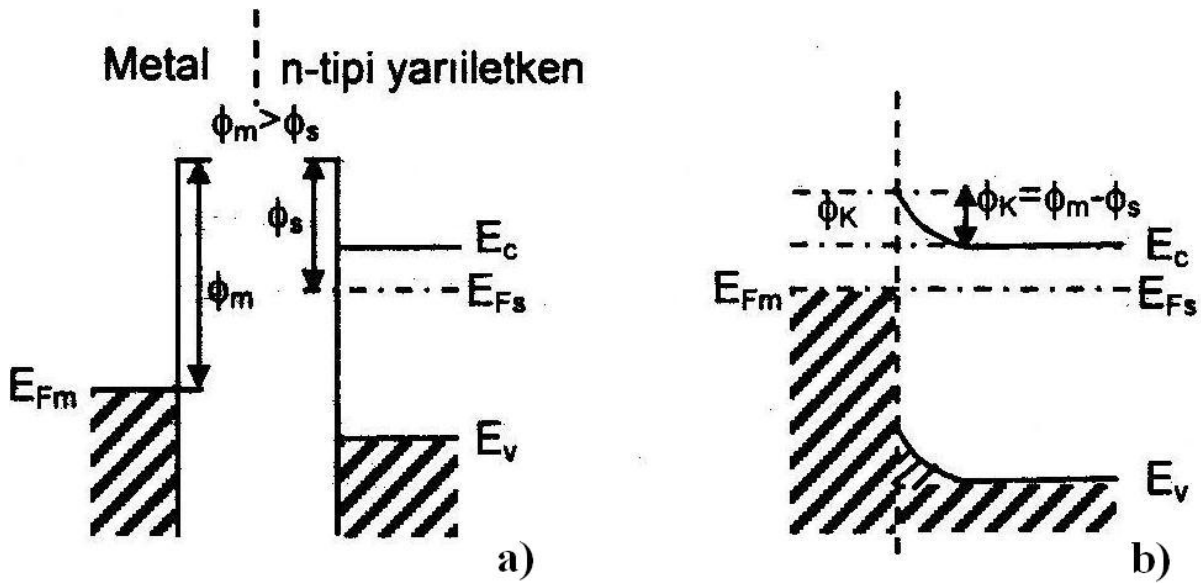
Yarıiletken devre elemanlarına yapılan metal kontaklar, devre elemanının karakteristiğini ve çalışma performansını etkilemektedir. Bu tür kontakların sınır bölgesinde potansiyel engeller oluşmaktadır. Oluşan potansiyel engel yük taşıyıcıların konsantrasyonunu ve malzeme içinde dağılımını etkilemektedir.

Metal ve yarıiletkeni bir araya getirmekle oluşacak kontağın fiziksel karakteristiğini bu iki

malzemenin *termodinamik çıkış işlerinin* büyüklükleri belirlemektedir. Elektronu katı malzemedan (metal yada yarıiletken) vakum seviyesine atabilmek için gerekli olan minimum enerjiye *çıkış işi* adı verilmektedir. Katılarda elektronu fermi seviyesinden vakuma atmak için gerekli olan enerjiye termodinamik çıkış işi adı verilir. Yarıiletkenlerin çıkış işi 1-6 eV arasındadır. (Caferov, 2000)

1.2.1 Schottky Kontak

Metalin çıkış işi (Φ_m), n-tip yarıiletkenin çıkış işinden (Φ_s) büyük olduğu durumda ($\Phi_m > \Phi_s$) her iki malzemenin temas öncesi bant diyagramları Şekil 1.1'deki gibidir.

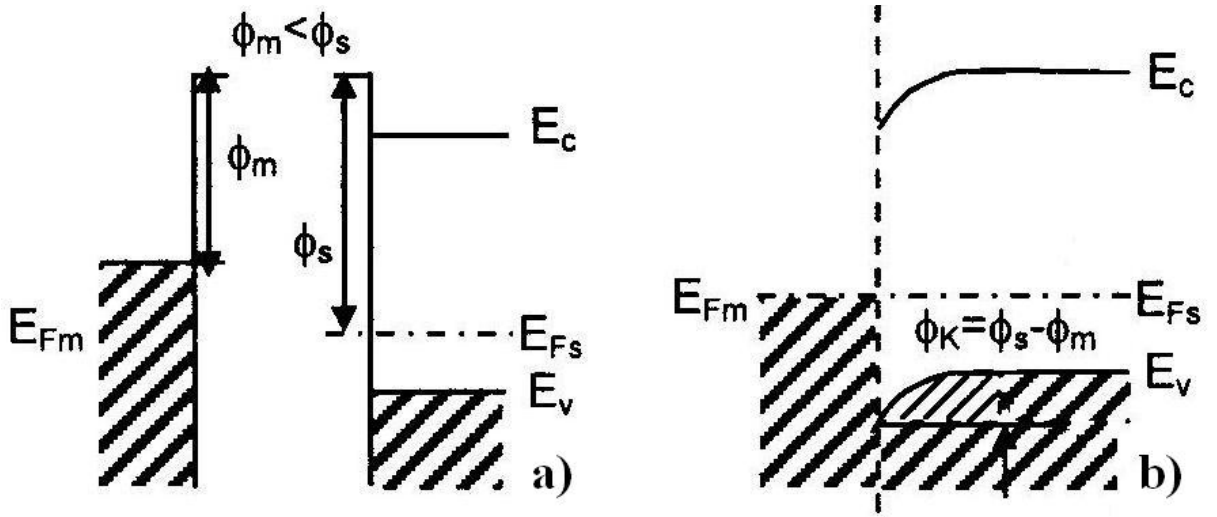


Şekil 1.1 $\phi_m > \phi_s$ durumunda a) Metal-n-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu kontak. (Caferov, 1998).

Metal ile n-tip yarı iletken fiziksel olarak temas ettirildiğinde, metalin çıkış işinin yarı iletkenin çıkış işinden büyük olması nedeni ile yarıiletkendeki metale fermi seviyeleri eşit olana kadar elektron akışı oluşur. Bu geçiş sonucunda metalde fazla elektron ve aynı zamanda yarıiletkende metale yakın bölgede fazladan pozitif yük oluşmaktadır. Yarıiletkende pozitif yükün olduğu bu bölgeye arınma bölgesi (veya Uzay yükü bölgesi) adı verilir ve bu bölgede enerji bandında eğim oluşmaktadır (Şekil 1.1 b). Bu eğimin büyüklüğünü metal ile yarıiletkenlerin çıkış işlerinin farkı belirlemektedir ve bu farka kontak potansiyeli adı verilir..

$$\Phi_K = \Phi_m - \Phi_s \quad (1.1)$$

Benze şekilde, metal ile p-tipi yarıiletken temasa getirildiğinde, metalin çıkış işi yarı iletkenin çıkış işinden küçük olduğu durumda kontak potansiyeli oluşur (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 $\phi_m < \phi_s$ durumunda a) Metal-p-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu kontak. (Caferov, 1998).

Bu tip eklemlere Schottky eklem veya Schottky diyodu adı verilir ve elektriksel karakteristiği diyot karakteristiğindedir. Schottky kontağın oluştuğu durumda kontak potansiyelleri farkı çok büyükse, eklemün kontak bölgesinde yarıiletken içinde bandın eğimi de büyük olur. Bu nedenle de yüzey bölgenin iletkenlik tipinde değişim olur. Yüzey bölgesindeki değişime uğramış bu tabakaya inversiyon tabakası adı verilir.

Yarıiletken içinde oluşan uzay yükü bölgesinin genişliği

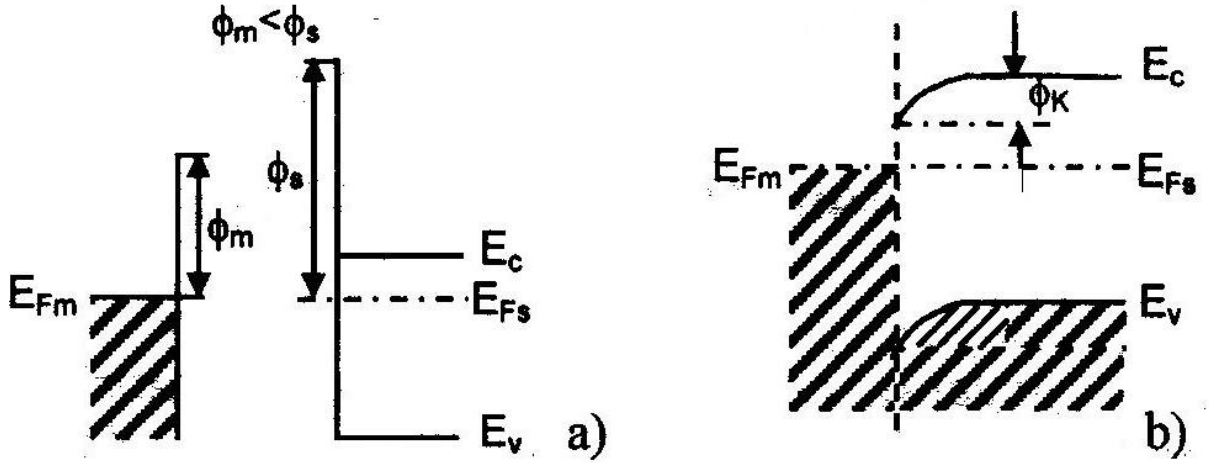
$$L_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_o\epsilon\phi_k}{eN_d}} \quad (1.2)$$

eşitliği ile verilmektedir. Bu eşitlikte ϵ_o elektrik sabiti, ϵ dielektrik katsayısı, e elektron yükü, N_d donörlerin konsantrasyonu ve ϕ_k kontak potansiyellerinin farkıdır (Caferov, 1998).

$$e\phi_k = \phi_m - \phi_s \quad (1.3)$$

1.2.2 Omik Kontak

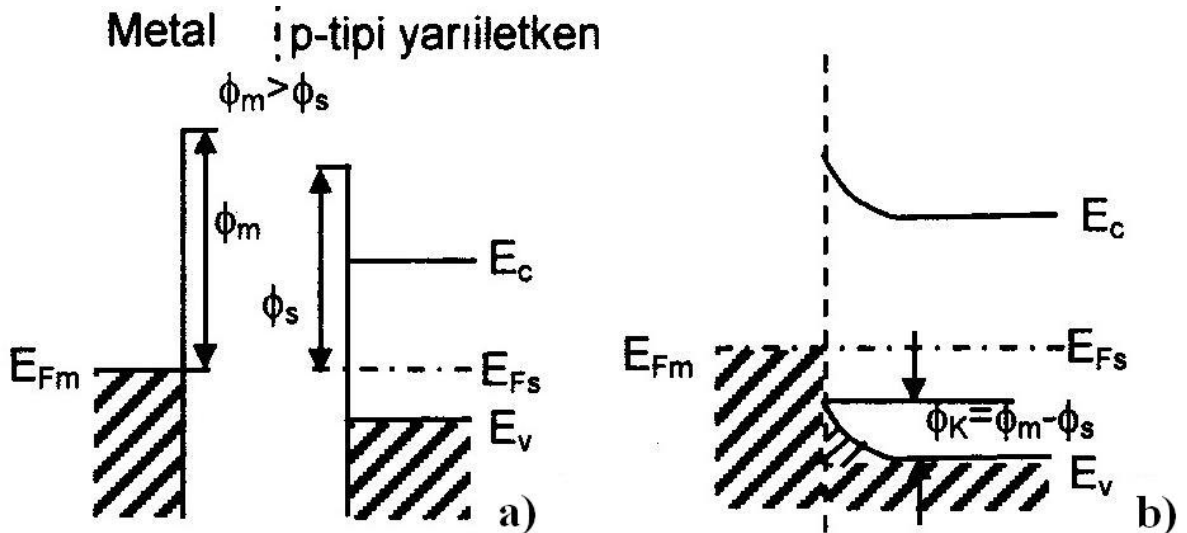
Metalin çıkış işi, n-tip yarıiletkenin çıkış işinden küçük olduğu durumda ($\phi_m < \phi_s$), çıkış işleri Şekil 1.3'deki gibidir.



Şekil 1.3 $\phi_m < \phi_s$ durumunda a) Metal-n-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu olmayan kontak. (Caferov, 1998).

Metal ile yarıiletken temas ettirildiğinde metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden küçük olduğu için metalden yarıiletkene elektron akışı olur. Bu durumda yarıiletkenin temas bölgesinde enerji bandı aşağıya bükülür sonuçta yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu daha büyük olur ve bu bölgenin direnci azalır. Bu yapıya omik eklem adı verilir.

Benzer omik eklem metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin çıkış işinden büyük olduğu durumda ($\phi_m > \phi_s$) da gerçekleşir (Şekil 1.4).



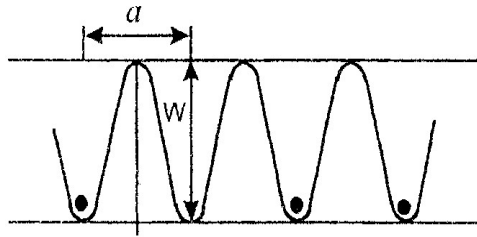
Şekil 1.4 $\phi_m > \phi_s$ durumunda a) Metal-p-tip yarıiletkenin temas öncesi enerji bant diyagramı, b) temas sonrası bant diyagramı, doğrultucu olmayan kontak (Caferov, 1998).

1.3 Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları

Katılarda atomlar, ısı etkisi ile denge konumları etrafında küçük genlikli titreşimler yapmaktadırlar. Birçok atom ortalama titreşim enerjisine sahip olmakla birlikte çok az sayıda bulunan atomların enerjisi ortalama enerjiden büyük ya da küçük olacaktır. Sıcaklık arttıkça yüksek enerjili atomların sayısı artacak aynı zamanda bazı atomların enerjisi de artacaktır. Enerjisi yüksek olan bu atomlar bulundukları yerdeki komşu atomlarla bağlarını koparıp kristalde bir denge konumundan komşu boş bir denge konumuna ya da ara yere yerleşebilir. Zaman ilerledikçe süreç devam eder. Malzeme içinde atomların bir noktadan diğerine taşınması olayına difüzyon adı verilir (Caferov, 1998).

Saf malzemede, kendi atomlarının yer değiştirmesi öz-difüzyon, katkı atomların yer değiştirmesine difüzyon adı verilir.

Isı etkisi nedeni ile malzeme içinde ilerleyen atomun bir denge konumundan diğerine geçmesi, bu iki konum arasındaki potansiyel engelini aşmakla mümkün olmaktadır. Bunun için gerekli enerjiye difüzyon aktivasyon enerjisi (W) adı verilir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Kristalde atomlar arası potansiyel engellerinin gösterimi (W potansiyel engelinin yüksekliği, a örgü mesafesi). (Caferov, 1998).

Kristal yapıya sahip malzemelerde, atomlar bir denge konumundan diğerine elemanter olarak geçişlerini farklı mekanizmalarla gerçekleştirebilmektedirler. Geçişleri sağlayan muhtemel mekanizmalar:

1) Çift Yer Değiştirmesi:

Komşu iki atomun aynı anda yer değiştirmesi şeklinde gerçekleşir. Düzenli kristal yapıda bu mekanizmanın gerçekleşme olasılığı oldukça küçüktür ve daha çok metallerde görülür. (Şekil 1.6a).

2) Halka Yer Değiştirmesi:

Dört komşu atomun aynı anda yer değiştirmesi olup düzenli yapılarda olma olasılığı düşüktür. Her atom bir örgü parametresi uzaklığı atlamaktadır. (Şekil 1.6b).

3) Vakansiyon veya Bořluklarla Difüzyon:

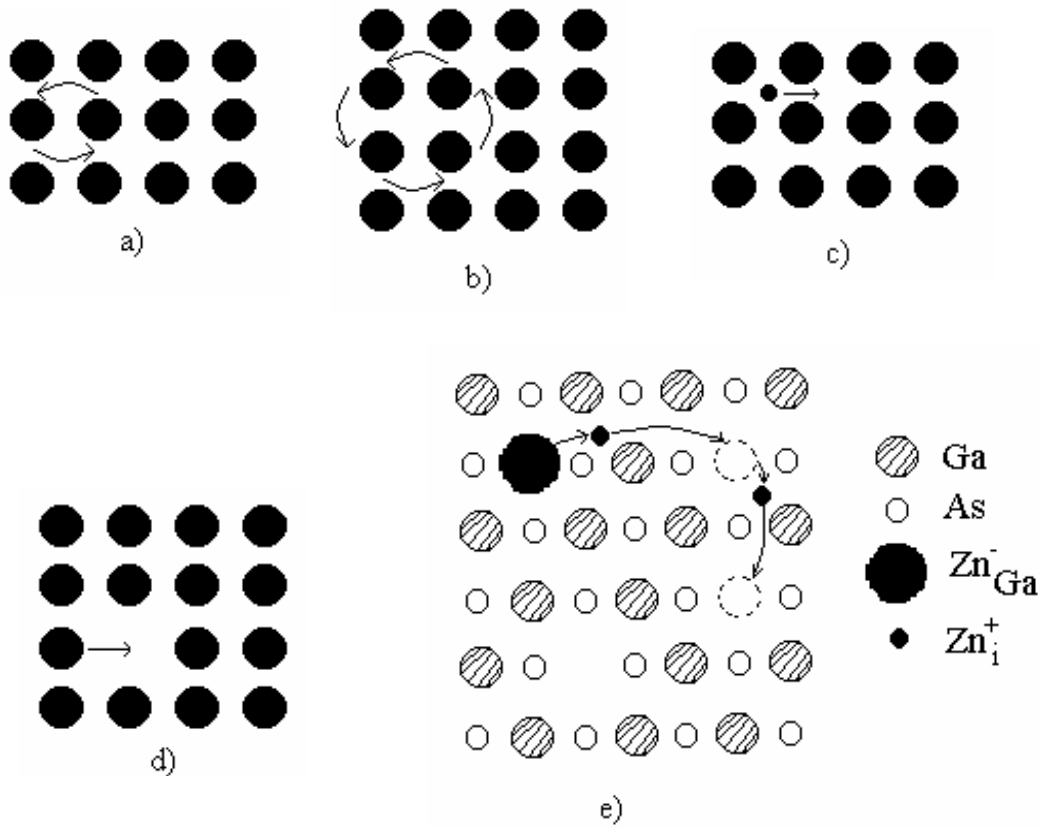
Vakansiyonda atom bulunduğu yerden komşu boşluğa geçer. Bu mekanizma en çok kristallerde, metallerde olur (Şekil 1.6d).

4) Ara Yer ile Difüzyon:

Kristalde atomun bir arayer pozisyonundan diğerine atlaması ara yer mekanizmasının temelidir (arayerle difüzyon). Bu mekanizma iyon yarıçapı küçük atomlar için mümkündür (Şekil 1.6c).

5) Karmařık veya Dissosiyatif Mekanizma:

Bu mekanizma boşluk ve arayer mekanizmaların bileşimidir (Şekil 1. 6e).



Şekil 1.6 Atomların difüzyon mekanizmaları: (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998)

1.3.1 Difüzyon Kuralları

Difüzyona ait kurallar 1855 yılında Adolf Fick tarafından verilmiş olup difüzyonun birinci ya da ikinci kuralı olarak adlandırılır.

Difüzyonun birinci kuralı : Malzeme içinde parçacıkların difüzyon akısı, bunların konsantrasyon gradyenti ile orantılıdır.

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.4)$$

Burada J parçacık akısı, N atomların konsantrasyonu, D difüzyon katsayısı olup burada (-) işareti difüzyon akış yönünün konsantrasyon gradyentinin azaldığı yöne doğru olması nedeni ile konmuştur. Difüzyon katsayısı D nin açık ifadesi,

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (1.5)$$

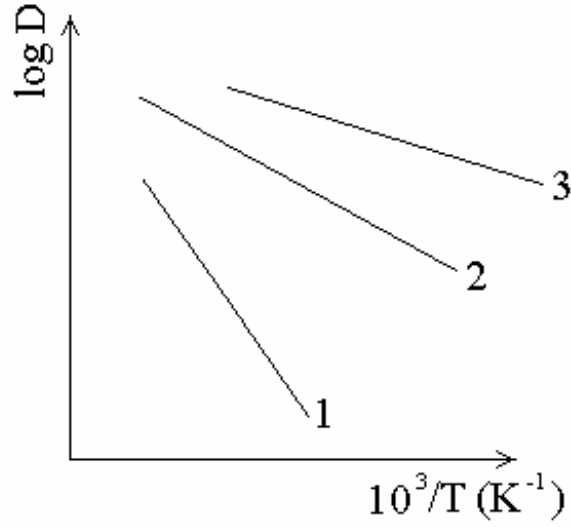
şeklindedir. Burada α boyutsuz bir sabit olup kristalin örgüsüne bağlıdır. Basit kübik için $\alpha = \frac{1}{3}$, hacim merkezli kübik için $\alpha = \frac{1}{8}$, yüzey merkezli kübik için $\alpha = \frac{1}{12}$ dir. ν atomların titreşim frekansı, a örgü sabitidir (Caferov, 1998).

Difüzyon katsayısının birimi (cm^2/s) atomların yer değiştirme hızını ifade eder.

Difüzyon katsayısı sıcaklık arttıkça artmaktadır ve sıcaklığa bağlı ifadesi Arrhenius eşitliği ile ifade edilmektedir. Boşluk mekanizması ile kristalde hareket eden atomlar için Arrhenius eşitliği,

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (1.6)$$

şeklindedir. Burada T mutlak sıcaklık $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K boltzman sabiti D_0 atomların titreşim frekansı ve atlama mesafesin bağlı olan üstel fonksiyon çarpanıdır.



Şekil 1.7 (1) Boşluk, (2) ara yer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı (Caferov, 1998)

Difüzyonun ikinci kuralı : Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (1.7)$$

(1.1) denkleminde uygulanırsa,

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.8)$$

ikinci Fick kuralını ifade eden denklem ortaya çıkar, buna göre, konsantrasyonun zamanla değişim hızı konsantrasyonun ikinci türevine bağlıdır.

(1.8) diferansiyel denkleminin çözümlerini, sistemin başlangıç şartları belirlemektedir.

a) Sabit Konsantrasyonlu Kaynaktan difüzyon :

Bu tür difüzyonda başlangıç şartları,

$$N(x,0)=0, \quad (1.9)$$

$$N(0,t)=N_0 \quad (1.10)$$

ifadeleri ile verilir. Burada (1.9) denklemi ilk anda numune içine difüzyon etmiş atom olmadığını, (1.10) denklemi ise difüzyon süresince konsantrasyonun değişmediğini (difüzyon

yapacak katkı atomlarının sabit kaynaktan) geldiğini söylemektedir.

Bu sınır ve başlangıç şartlarına göre difüzyonun ikinci kuralı (1.8) denklemi çözüldüğünde,

$$N(x,t) = N_o \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1.11)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklemde Gauss veya olasılık fonksiyonu olan hata fonksiyonunun açık ifadesi,

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (1.12)$$

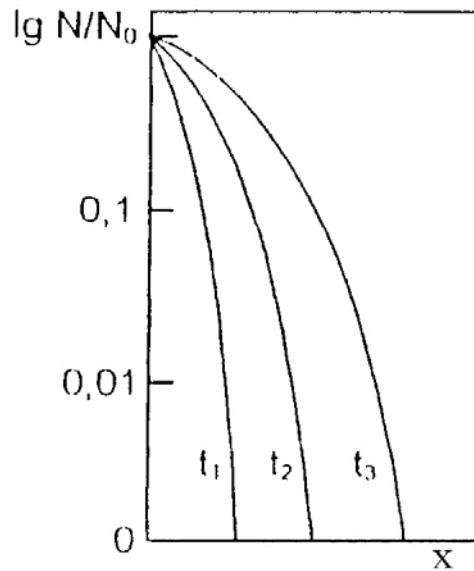
şeklindedir.

Bu fonksiyonun yaklaşık değerleri aşağıda verilmiştir.

$$\operatorname{erf} z \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} z, \quad z \ll 1 \quad (1.13)$$

$$\operatorname{erf} z \approx \frac{\exp(-z^2)}{z\sqrt{\pi}}, \quad z > 1 \quad (1.14)$$

Şekil 1.8'deki grafik, sabit konsantrasyonlu kaynaktan yarı sonsuz numuneye difüzyonun farklı zamanlardaki konsantrasyon değişimini göstermektedir.



Şekil 1.8 Sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyonla atomların, örnek kalınlığı ile konsantrasyonun değişimi (Caferov, 1998).

b) *Son derece ince filmde difüzyon*: Bu tür difüzyonun başlangıç ve sınır şartları,

$$N(x,0) = \begin{cases} Q & x = 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

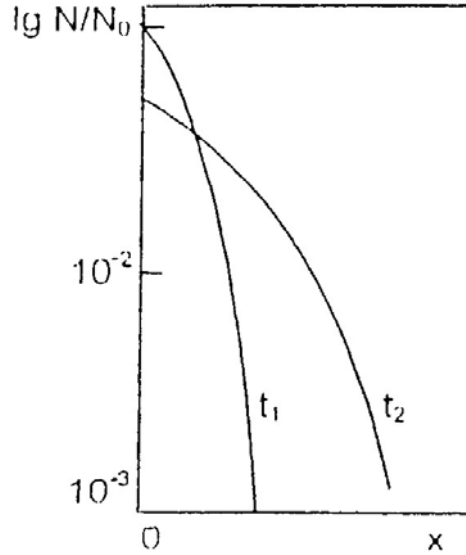
şeklindedir. Burada Q birim alanda bulunan atom sayısıdır. Son derece ince filmde difüzyonda, difüzyon yapacak olan atomların sayısı numune ye göre çok azdır ve herhangi bir zaman sonra tüm atomlar tam olarak difüzyon etmektedirler. (Caferov 1998).

Denklem (1.15) ile ifade edilen başlangıç şartlarını difüzyonun ikinci kuralına ait denklemin çözümü için kullanıldığında,

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (1.16)$$

çözümü elde edilir.

Son derece ince filmde difüzyonda örnek kalınlığı boyunca konsantrasyon değişimi Şekil 1.9'daki gibidir.



Şekil 1.9 Son derece ince filmde difüzyonda atomların kalınlıkla konsantrasyon dağılımları (Caferov 1998).

1.4 CdTe Filmlerini Üretme Yöntemleri.

CdTe ince film birçok teknikle kolaylıkla üretilebilir ve üretim tekniklerinden birçoğu aşağıdaki iki özelliğe dayanmaktadır. (Markvart, 2003)

- a) CdTe vakumda 600°C ye kadar ısıtılırsa ve eşit miktarda Cd ve Te serbest bırakacak şekilde sublimleşir.
- b) 400°C sıcaklığında (veya üzerinde) olan altlık üzerine yoğunlaşan CdTe (veya kaplama işleminden sonra bu sıcaklıkta ısıtılırsa) katı fazdadır. Bileşiği oluşturan elementlerin buharlaşma basıncı bileşiğin basıncından oldukça büyüktür.

Bu özellikler ince film yarıiletken yapma kolaylığı bakımından CdTe bileşiğini diğer yarıiletkenlerden oldukça üstün kılar.

Üretim tekniklerinden, yakın mesafeli süblimleşme (Close-Spaced Sublimation), Elektro-Kaplama (Electro-Deposition), Kimyasal püskürtme (Chemical Spraying), Elek kaplama (Screen Printing) en çok tercih edilenlerdir. Üretim teknikleri genel olarak Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Bu üretim tekniklerin hepsinde üretilen CdTe, kullanıldıkları CdTe/CdS güneş pillerinde yaklaşık aynı verime (%10-12) sahip olmaktadır. (Roussillon, 2004) ,

1.4.1 Yakın Mesafeli Süblimleşme

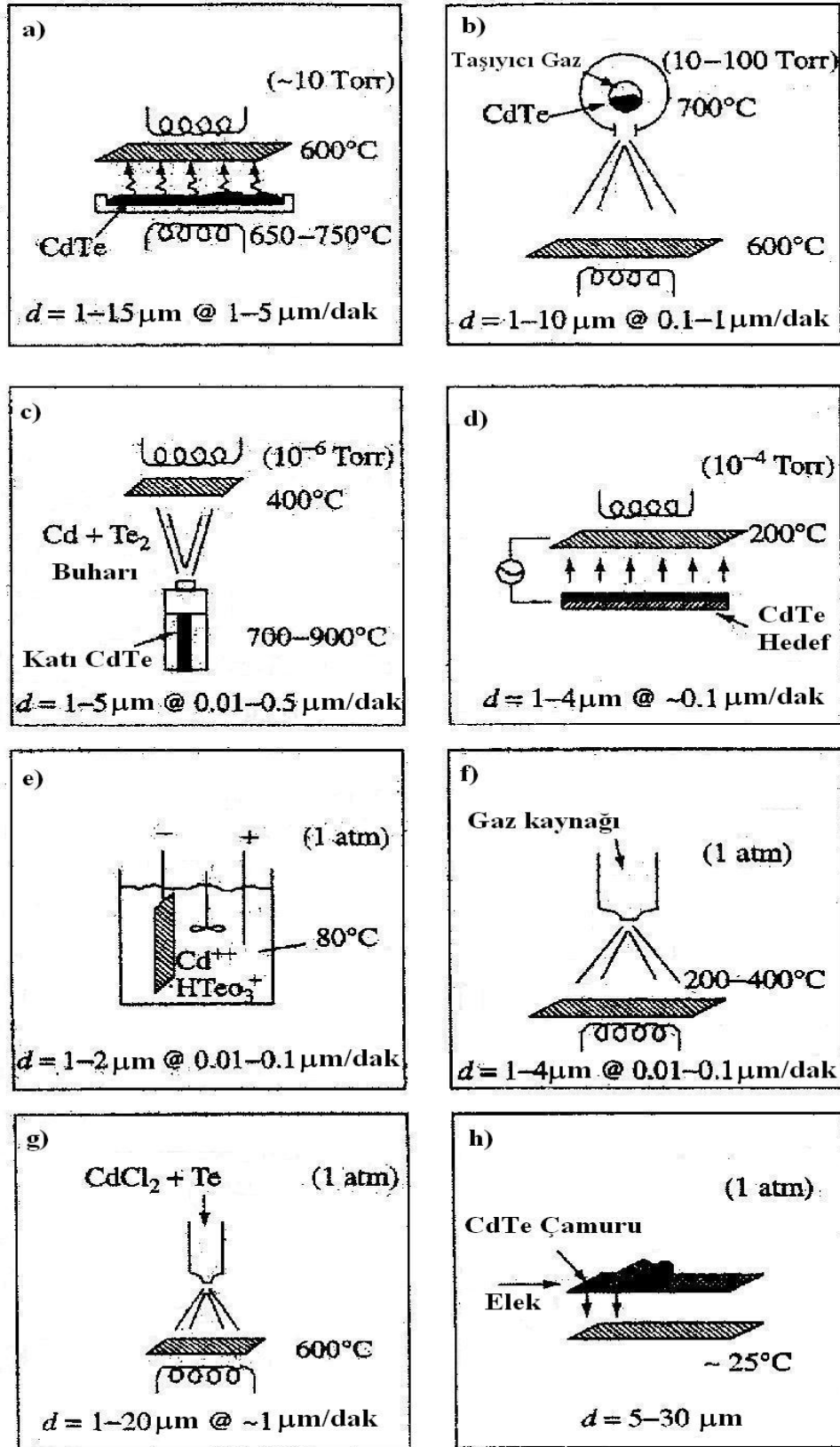
Bu yöntemde toz ya da granül yapıda katı fazdaki CdTe nin vakumda süblimleşmesi ile elde edilir. Ortalama 10 Torr luk basınçta, cam altık üzerine süblimleşme ile kolaylıkla kaplanır. Altık sıcaklığı 400 ile 600°C arasında olmalıdır. Altık sıcaklığı 600°C çıkarıldığında film kalitesi artar. Daha yüksek sıcaklıkta film tekrar geri süblimleşmeye başlar. Kaplama sürecinde film stokiometresi ile oynanarak n-tip ya da p-tip CdTe elde edilebilir. Bu teknikle 5µm/dak kaplama hızına ulaşılabilir ve geniş yüzeylere CdTe ince film kaplanabilir (Şekil 1.10a).

1.4.2 Elektrokimyasal Kaplama

CdTe ince film bu teknikte suda seyreltilmiş CdSO₄ ve Te₂O₃ den elde edilmektedir. Çözelti yaklaşık olarak 80-90°C aralığında bulunmaktadır (Şekil 1.10e). Bu teknikte n-tip düşük kalitede elektronik özelliğe sahip film elde edilmektedir. Temel reaksiyon,



olup reaksiyon,



Şekil 1.10 İnce film CdTe üretim yöntemleri. a) yakın mesafeli süblimleşme, b) buhar taşımali kaplama, c) Fiziksel buhar kaplama, d) Sputter kaplama, e) Elektrokimyasal kaplama, f) metal organik kimyasal buhar kaplama, g) kimyasal püskürtme, h) Elek kaplama (Luque, 2003) ve (Roussillon, 2004)



şeklinde iki ara reaksiyonla gerçekleşir. H_2SO_4 çözeltisi içinde 1M konsantrasyonlu Cd ve 10^{-3} M konsantrasyonlu TeO_2 çözelti hazırlanır kaplama gerçekleştirilir. Kaplanan CdTe ince filmin tanecik boyutlarını büyütme, iletkenlik tipini p-tip yapmak ve elektronik iletim özelliğini iyileştirmek için klor Cl katkılı bileşikler içeren ortamda tavlama yapılır. Bu teknikte altlık üzerinde bulunan transparan iletken üzerine elektrik alanı sağlamak amacı ile gerilim uygulanır ve CdTe nin bu iletken üzerine kaplanması sağlanır. Kaplanan filmin homojen olması amacı ile iletken yüzey üzerindeki gerilimin (0.7-1.1 Volt arasında) homojen olması sağlanır, bu homojenlik düşük akım yoğunluğu ile sağlanır bu durum düşük kaplama hızına (dakikada 0.1µm) sebep olmaktadır.

1.4.3 Kimyasal Püskürtme

Bu yöntemde ısı ile Cd ve Te bileşenlerine ayrılan sıvı fazdaki kimyasal bileşikler ($CdCl_2 + Te$) ısıtılmış altlık üzerine püskürtülür. Isı etkisi ile kimyasal bileşikteki diğer elementler altlıktan uzaklaşır. Geride kalan Cd ve Te elementleri ısı ($600^\circ C$) etkisi ile CdTe ince filmini oluşturur (Şekil 1.10g). Bu teknikte yaklaşık dakikada 1µm kaplanabilmektedir. Bu teknik ile 1 atm atmosfer basıncında kaplama yapılabilmektedir.

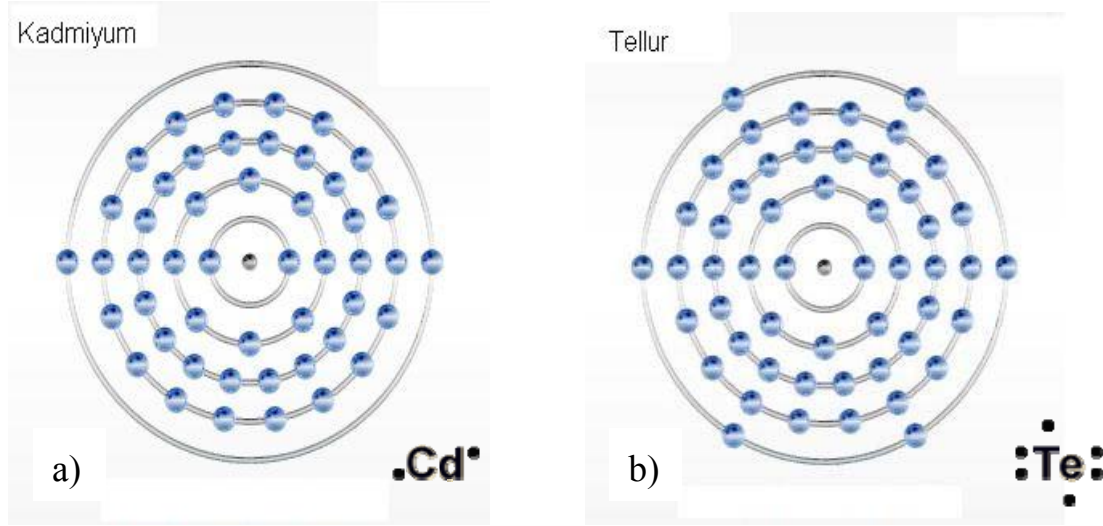
1.4.4 Elek Kaplama (Screen Printing)

Cd ve Te elementlerini içeren hamur şeklindeki karışım altlık üzerine ince film şeklinde kaplanır ve $CdCl_2$ etkisi altında altlık ısıtılarak CdTe ince film oluşturulur (Şekil 1.10h). Bu teknik ile elde edilen ince filmde gözeneklerin oluşması nedeni ile kalın örnekler güneş pillerinde kullanılmaktadır.

1.5 CdTe'nin Yapısal Özellikleri

Kadmiyum Tellur ($CdTe$) yüz yılı aşkın bir süredir bilinmekte olup ilk olarak Marottet tarafından 1879 yılında yapılmış, oluşum ısısı Fabre tarafından rapor edilmiş ve 1946 yılında Frerichs ve Warminsy tarafından Cd elementinin ince film kalkojenitlerinin beta ve gamma radyasyonlarına duyarlı olduğunu tespit edilmiştir. 1948 yılında $CdTe$ den fotosel yapılmıştır. $CdTe$ nin üretiminde sıcaklık ve stokiometrenin değişimi foto pilin performansını etkilemektedir.

CdTe yarı iletkeninin yapısını oluşturan Cd periyodik tabloda II. grupta, Te ise periyodik tabloda VI. grupta yer alır. Elementlerin kabuk modeli Şekil 1.11’de gösterilmiştir.



Şekil 1.11 Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd, (b) Te.

Çizelge 1.1 Cd ve Te elementlerinin Elektronik ve yapısal özellikleri

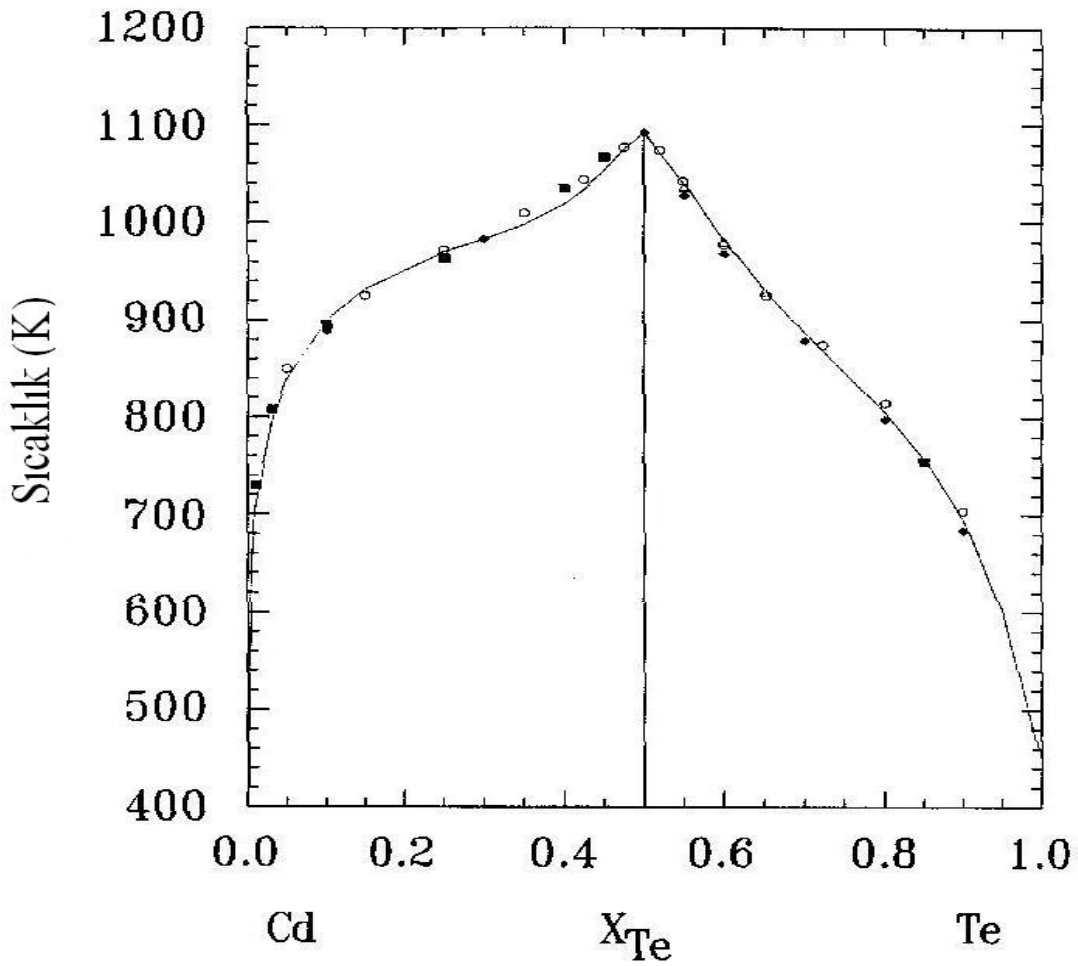
Element	Cd	Te
Kristal yapısı	Hekzagonal	Hekzagonal
Elektron Sayısı	48	52
Proton Sayısı	48	52
Valans Elektronları	$5s^2$	$5s^2p^4$

Periyodik tablonun II. grubunda bulunan kadmiyum ve VI. grubunda bulunan tellür elementleri aralarında kovalent ve iyonik bağ yaparak kadmiyum tellür (CdTe) bileşiğini oluştururlar. Kovalent bağ son yörüngedeki valans elektronlarının ortak kullanımıyla kararlı bir hal oluşturan kuvvetli bir bağdır. CdTe iyonik bağ oranı 0.64 olarak verilmektedir. CdTe ince film şeklinde iken ya kübik çinko sülfid yapısında ya da hegzagonal yapıda bulunur.

CdTe üzerine termodinamik çalışmalar bir çok araştırmacı tarafından yapılmıştır. CdTe nin erime noktası 1092 ± 1 °C olarak belirlenmiştir. Burada %50 Te atomu kullanılmış olup oluşum entalpisi -27874.6 cal/mol ve oluşum entropisi -7.9332 cal/mol-K dir.

Kulwicki, faz diyagramında eutectic sıcaklığı Cd tarafında 324 ± 1 °C ve tellur tarafında 449 ± 2 °C olarak belirlemiştir (Şekil 1.12).

Yu ve Brebrick tarafından kullanılan modele göre çizilen CdTe nin faz diyagramı Şekil 1.12 deki gibidir.



Şekil 1.12 CdTe nin faz diyagramı. Koyu kareler Kulwicki, açık daireler Lorentz , koyu daireler Steininger, ve açık üçgenler Brebrick'e ait sonuçlardır (F. Rei, 1994).

Yu ve Brebrick tarafından belirlenen ısı kapasitesi,

$$C_p = 10.668 + 4.3446 \times 10^{-3} T \quad \text{cal/mole-K} \quad 298 < T < 13165.15 \text{ K}$$

Gaz fazından katı yapının oluşumu aşağıdaki reaksiyon denklemi ile gösterilir.



Burada Cd mono atomik ve Te₂ diatomik yapıdadır.

Brebrick ve Strauss, 780 ile 939 °C sıcaklıkları arasında katı süblimleşme için Gibbs serbest enerjisini,

$$\Delta G[\text{CdTe(s)}] = -68.64 + 44.94(10^{-3})T \text{ kcal/mole}$$

şeklinde ölçmüştür.

Cd ve Te atomlarından oluşan CdTe yapı Hekzagonal Çinko Blendi yapısında oluşur.

1.5.1 Kübik Çinko Sülfid Yapısı

Çinko sülfid yapısı, elmas yapıya benzer olup farklı olarak çeyrek cisim köşegeni kadar ötelenmiş iki yüzey merkezli yapı olarak görülebilir. Birim hücresinde dört atomdan oluşur ve ilkel hücresi kübik yapıdadır. CdTe yapıda yüzey merkezli örgülerden birine Te atomları, diğerine Cd atomları yerleşir. (Zanio, 1978)

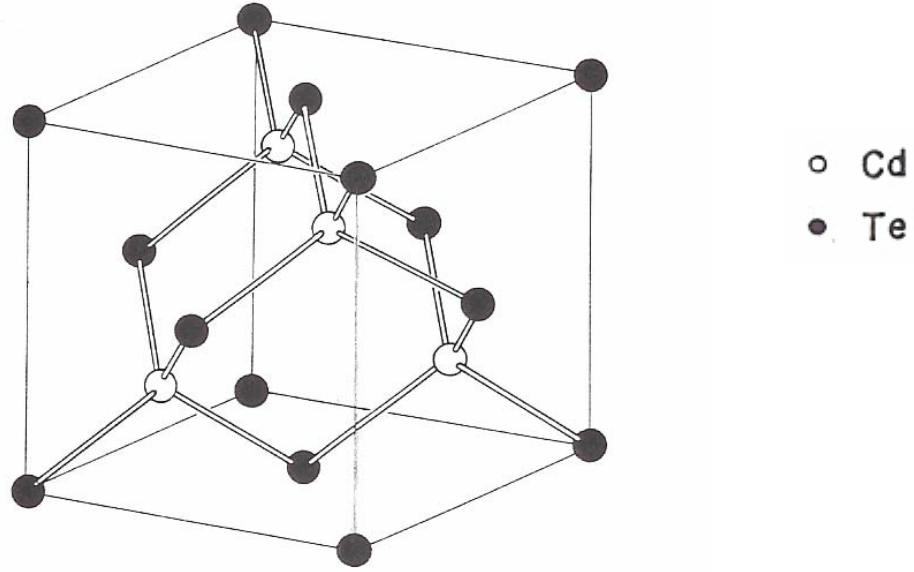
Te atomlarının koordinatları;

$$(000), \left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right)$$

Cd atomlarının koordinatları;

$$\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right), \left(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right), \left(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}\right), \left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}\right)$$

$a = 6.483 \text{ Å}$ örgü sabiti olmak üzere her atomun çevresinde $\frac{\sqrt{3}a}{4}$ uzaklığında tetrahedral olarak 4 atom bulunur (Şekil 1.13).. Oda sıcaklığında örgü parametresinin en uygun değeri $6,481\text{Å}^\circ$ dür. Örgü sabiti kristal büyütülürken Cd veya Te zenginliğine göre çok az değişir. Cd zenginliğinde 6.480 Å , Te zenginliğinde ise 6.488 Å olabilir (Zanio, 1978).

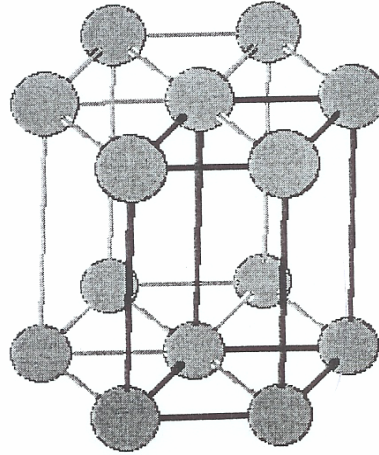


Şekil 1.13 CdTe bileşiğinin kübik çinko sülfür yapısı (Zanio, 1978).

Sıkı Paketli Altıgen Yapı (Hekzagonal)

Bu yapıda, ortada bulunan atom bir düzlemde diğer her komşu altı atoma değecek şekilde sıkı paketlenmiş bir A tabakasına yerleşmektedir. Bu tabaka hem hekzagonal yapının taban düzlemine hem de yüzey merkezli yapının (111) düzlemine karşılık gelmektedir. İkinci bir B tabakası bunun üstüne ve alt tabakadaki 3 küreye değecek şekilde yerleştirilir. Üçüncü tabakanın küreleri, en alttaki tabakanın bıraktığı boşluklar üzerine geliyorsa yüzey merkezli yapı elde edilmektedir. Tersine üçüncü tabakanın küreleri, birinci tabakanın kürelerinin tam üstüne gelecek şekilde yerleştirilirse hekzagonal yapı oluşmaktadır.

CdTe ince filminin kübik veya hekzagonal olması film büyütme şartlarına bağlıdır. Ani sıcaklık değişimleri sonunda, kadmiyumun veya tellürün aşırılığı yapıyı etkilemektedir ve hekzagonal yapıya geçirmektedir. Hekzagonal yapının örgü parametresi, $a=4.58 \text{ Å}$, $c=7.50 \text{ Å}$ 'dur. Yüksek basınç altında CdTe, NaCl tarzında bir kristalyapıya sahip olur. 35 kbar basınçta $a=5.86 \text{ Å}$ düşer. Birim küpün hacmi % 25 oranında azalır. Basınç 300 kbar'a arttırıldığında ise $a=5.62 \text{ Å}$ 'a kadar azalır. Kristal yapısındaki bu değişme bileşiğin termal ve elektriksel özelliklerinde değişmesine neden olur. CdTe'ün elektriksel iletkenliği basınçla doğru orantılı olacak şekilde artış gösterir.



Şekil 1.14 CdTe hekzagonal yapısı (Ongül, 2004)

Deneysel çalışmalarımızda hekzagonal ve kübik çinko sülfür yapısında üretilmiş olan CdTe filmler kullanılmıştır.

1.6 CdTe'nin Elektriksel Özellikleri

Yarıiletkenlerin yasak bant E_g enerji aralığı 0.1 ile 3 eV arasında olup valans bandındaki elektron iletkenlik bandına fiziksel etki ile kolaylıkla geçebilmekte ve yarıiletkenin iletkenliği değişmektedir. Yarı iletkenlerin iletkenlikleri sıcaklık, basınç, elektromanyetik ışın, katkılama gibi etkilerle 10^{-10} dan 10^4 $(\Omega.cm)^{-1}$ aralığında değiştirilebilmektedir. Yarıiletkenler özden ve katkılı olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

Temiz ya da katkısız kusursuz yarıiletkenlere özden yarı iletken adı verilir. Mutlak sıfırda kovalent bağlarda hiçbir elektron eksikliği yoktur. Isısal enerjinin etkisi ile bazı kovalent bağlarda kopma meydana gelir kopan elektron serbest kalır ve kopan elektronun boş kalan yerinde delik oluşur. Bu şekilde eşit sayıda elektron delik çifti oluşur ve özden yarıiletkenin iletkenliğini sağlar. İletkenliği sıcaklık arttıkça,

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1.21)$$

bağıntısı ile artmaktadır (Caferov, 2000).

Çizelge 1.2 CdTe yarıiletkenine ait bazı parametreler.

Kristal yapısı	Kübik çinko sülfür
Örgü parametresi (a)	6.483 Å
Yasak enerji aralığı (E_g) T=300 K	1.44-1.5 eV
İletkenlik tipi	p veya n
Erime noktası (Çinko Blendi)	1041 °C
Yoğunluk (ρ)	5.85 g/cm ³
Kırılma indisi (n)	2.69
Lineer termal genleşme katsayısı	5.9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Spesifik ısı	0.21 j/gK
Termal iletkenlik (25°C)	0.06 W/cmK
Dielektrik sabiti (ϵ)	10.2
Elektron mobilitesi (μ_e)	1100 cm ² /Vs
Elektron yaşam ömrü (τ_e)	3x10 ⁻⁶ s
Elektron Etkin Kütle oranı ($\frac{m_n^*}{m_o}$)	0,1
Delik mobilitesi (μ_h)	100 cm ² /Vs
Delik yaşam ömrü (τ_h)	2x10 ⁻⁶ s
Delik Etkin Kütle Oranı ($\frac{m_p^*}{m_o}$)	0,37
Elektron alınganlığı (χ)	4.3 eV
Richardson Sabiti A^* (A/cm ² K ²)	120
Debye Sıcaklığı (K)	200
Ortalama Atomik Kütle (g)	120.00

İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere katkılı yarıiletkenler adı verilir. Yüksek sıcaklıklarda katkılı yarıiletkenliğe özden iletkenlik de eşlik eder. Katkılı yarıiletkenler iletkenlik tipine göre n-tip ve p-tip olarak iki kısma ayrılır. Katkı atomları yarıiletken elektron veriyorsa donör katkı olarak tanımlanır ve bu tip yarıiletkende iletkenlik elektronlarla sağlanmakta olup n-tipi yarıiletken adını alır. Benzer şekilde katkı atomları elektron alıyor ise akseptör katkı olarak tanımlanır ve iletkenlik pozitif yüklü deliklerle sağlanır bu tip yarıiletken p-tip yarıiletken adı verilir.

CdTe 1.49 eV yasak enerji aralığına sahip yarıiletken olup güneş spektrumundan elektrik elde etmek için ideale yakın bant aralığına sahiptir. Yüksek absorpsiyon katsayısına sahip olması nedeni ile CdTe\CdS güneş pilinde absorplayıcı malzeme olarak kullanılır. Hetero-eklem güneş pilinde CdS n-tipi olduğundan CdTe p-tip tercih edilir. Öz direnci oldukça yüksek olup katkısız CdTe nin öz direnci 10^7 - 10^8 ohm.cm arasında değişmektedir. Bu direnç güneş pilinin verimini azaltmaktadır. CdTe üretim aşamasında ise ideale yakın stokiometreye sahip olur fakat bu durum katkılarla değiştirilmektedir. Çeşitli katkılarla bu direnç azaltılabilmektedir. p-tip CdTe nin direncini azaltmak için P, As, Sb, Cu, Ag ve aşırı miktarlarda Te katkısı kullanılmaktadır.

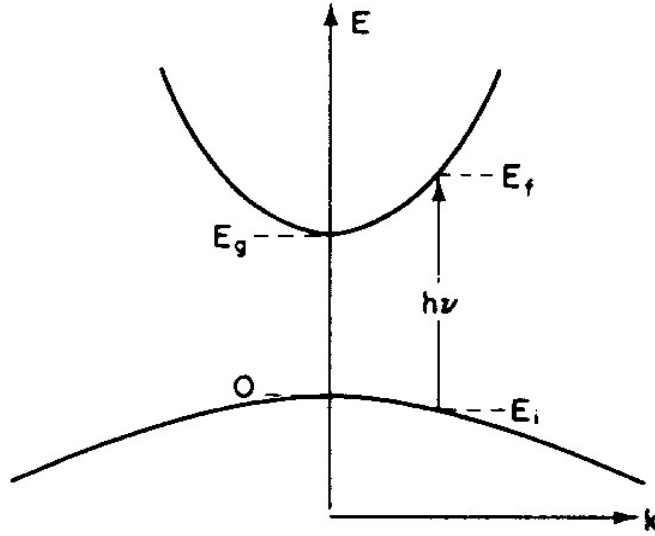
CdTe ince film üretim sürecindeki ortamın fiziksel şartları filmin iletkenliğini değiştirmektedir. Vakum kaplama tekniği ile elde edilen CdTe filmlerin sadece altlık sıcaklığı artırılarak, oda sıcaklığındaki öz dirençleri 5.4×10^6 ohm.cm değerine kadar düşürülmüştür (Jae-Hyeong Lee vd., 2003).

Polikristal şeklinde üretilen İnce film CdTe, üretim sonrası 400°C de tavlandığında iletkenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapıyı oluşturan tanecik boyutlarının tavlama sonrası büyüdüğü gözlemlenmiş olup bu durum iletkenliği arttırmıştır.

1.7 CdTe'nin Optik ve Fotoelektrik Spektrumları

CdTe yarıiletkeni, bant yapısı olarak direkt geçişli bant yapısına sahiptir. Direkt geçiş bant yapısında valans bandının tavanında bulunan elektronun momentumu iletkenlik bandında bulunan elektronun çizgisel momentumuna eşit ise elektron valans bandından iletkenlik bandına enerji kaybetmeden direkt olarak geçmektedir. Direkt bantlı yapıda iletkenlik bandının dibindeki elektron ile valans bandının tavanındaki elektronun lineer momentumu ve buna bağlı dalga vektörleri aynıdır.

Geçiş sonrasında iletkenlik bandın da dolaşan bir elektron, valans bandında bir boşluk meydana gelmektedir (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 Direkt band geçişi (Pankove, 1971).

Bu geçiş ısı yada foton ile dışarıdan uyarılarak mümkün olmaktadır. Fotonla uyarılmış yarıiletkende E_i başlangıç seviye E_f son enerji seviyesi olmak üzere,

$$E_f = h\nu - |E_i| \quad (1.22)$$

Eşitliği mevcuttur. Direkt bankt geçişi için absorpsiyon katsayısı $\alpha(h\nu)$, gelen foton enerjisine bağlı değişimi,

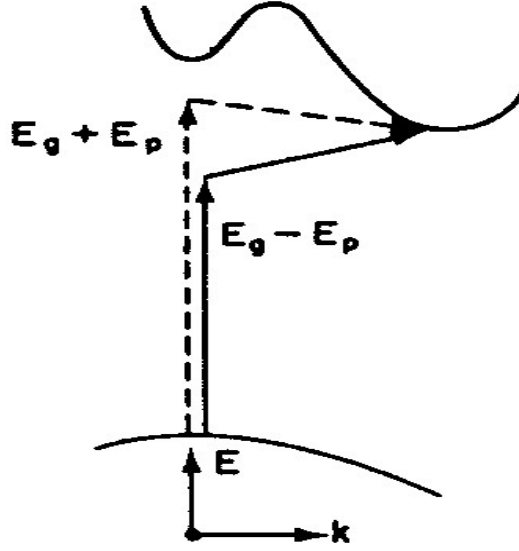
$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1.23)$$

şeklindedir (Pankove, 1971).

Yapılan birçok optik çalışmada CdTe yarıiletkenin oda sıcaklığındaki yasak enerji aralığı 1.45-1.5 eV olarak ölçülmüştür. Yasak enerji aralığının bu aralıkta olması üretim tekniklerine ve ölçülen CdTe yarıiletkenin kalınlığına bağlıdır. Elektro-kaplama tekniği ile elde edilen kalınlıkları 0.57, 0.7 ve 1.5 μm olan CdTe yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı sırası ile 1.512, 1.51, 1.49 eV olarak belirlenmiştir (Mathew vd., 1999) .

Diğer taraftan CdTe nin 1,82eV büyüklüğünde indirect bant geçişi gözlenmiştir (Chopra,

1933). İndirekt geçişte valans bandının maksimumunda bulunan elektronun momentumu ile iletkenlik bandının minimumunda bulunan elektronun momentumu farklı değerde konumlanmış ise bu durumda valans bandında bulunan elektronun uyarılma nedeni ile geçişinde momentum korunumu nedeni ile yeni bir parçacık *fonon* yayımı oluşacaktır. Benzer yapıda recombinyasyon sürecinde de fonon soğrulması meydana gelecektir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16 İndirekt bant geçişi (Pankove, 1971).

Oluşan fononlar genelde boyuna veya enine akustik fononlar olmaktadır. Her fonon karakteristi E_p enerjisine sahiptir. Fonon yayılımı (e) ve ya soğrulması (a) sırası ile,

$$h_e \nu = E_f - E_i + E_p \quad (1.24)$$

$$h_a \nu = E_f - E_i - E_p \quad (1.25)$$

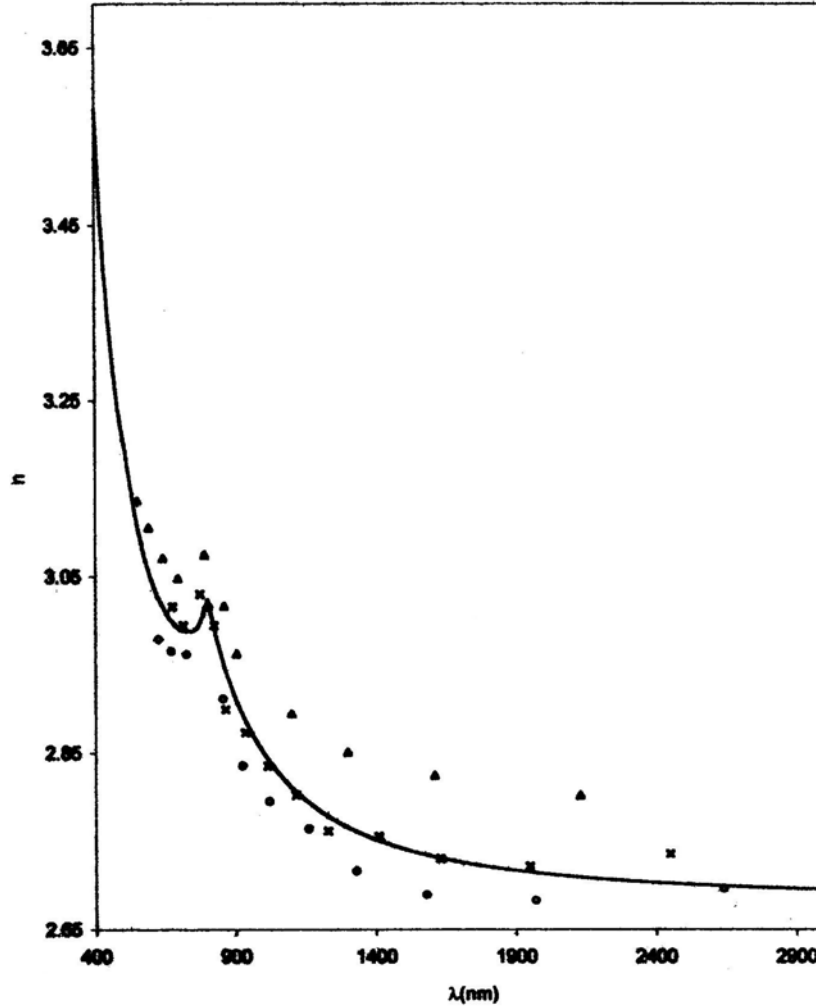
enerji korunumu ile ifade edilir. Her iki duruma ait absorpsiyon katsayısının foton enerjisine bağlı ifadesi sırası ile,

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp\left(\frac{E_p}{kT}\right) - 1} \quad (1.26)$$

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp\left(\frac{E_p}{kT}\right)} \quad (1.27)$$

şeklindedir (Pankove, 1971).

Mathew ve arkadaşları, farklı kalınlıklardaki tek kristal CdTe yarıiletkeninde foton enerjisine bağlı geçirgenlik ölçümlerinden kırılma indisi dispersiyon değişimini ölçmüşlerdir (Şekil 1.17).



Şekil 1.17 Farklı kalınlıklardaki Δ 0.57, $\bullet$ 0.734, $\times$ 0.895 μm elektro kaplama ile elde edilen CdTe örneklerin dalga boyuna bağlı kırılma indisi dispersiyon grafiği (Mathew, 1999).

Dispersiyon ölçümlerini klasik olarak bağlı elektron teorisine uygulamaları sonucu farklı şartlarda üretilmiş 0.7 μm kalınlıktaki CdTe örneklere ait rezonans frekansının dalgaboyu (λ_0), non-dispersive optik dielektrik sabiti ϵ_∞ , m_{BE} bağlı elektron kütlesi ve N_{BE} elektron etkin kütle konsantrasyonu olmak üzere $m_{\text{BE}}/N_{\text{BE}}$ oranını hesaplamışlardır (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3 Farklı şartlarda tavlanan CdTe örneklerine ait parametreler (Mathew, 1999)

Film	λ_o (nm)	ϵ_∞	m_{BE} / N_{BE}	m_{BE} (Kg)
Elektro-kaplama	390.6	6.615	22×10^{-60}	32×10^{-32} f
Havada Tavlanan	362	6.898	18×10^{-60}	26×10^{-32} f
Argon ortamında tavlanan	380.6	7.53	18×10^{-60}	26×10^{-32} f

Burada f , CdTe yapısındaki molekül başına bağlı elektron sayısı.

Sinterleme metodu ile elde edilen CdTe filmin dalga boyuna bağlı yansıma katsayısının değişimi ölçümleri oda sıcaklığındaki bant aralığı 1.46eV olarak vermiştir (Kumar, 2000).

Yarıiletken kristale ait enerji seviyeleri atomlar arası mesafenin fonksiyonudur. Bu durum yasak enerji aralığı için de geçerlidir. Atomlar arası mesafe basınç, sıcaklık değişimi gibi fiziksel etki ile değişmektedir. Bu duruma bağlı olarak direkt ya da indirekt bant aralığı da değişmektedir. Yarıiletkenin bant aralığı sıcaklığa bağlı olarak,

$$E_g = E_g^o + \left(\frac{\partial E_g}{\partial T} \right)_p \Delta T \quad (1.28)$$

bağıntısı ile değişmektedir. Optik geçirgenliğin sıcaklıkla değişimi ile yapılan ölçümlerde yasak enerji aralığı (1.28) bağıntısına uymakta ve sıcaklıkla yasak enerji aralığının değişim oranı -0.4meV/K dir ve mutlak sıcaklıkta CdTe nin yasak enerji aralığı 1.61eV dur (Mathew vd., 2000).

1.8 Katkıların ve Örgü Kusurlarının CdTe'nin Elektrik Özelliklerine Etkisi

CdTe yarıiletkenin, iletkenlik tipi n yada p tip olabilir. İstenildiğinde bir iletkenlik tipinden diğerine katkı veya kusurlarla kolaylıkla geçilebilir. Cd ve Te stokiyometresi değiştirilerek ince film CdTe yarıiletkenin iletkenlik tipi değiştirilebilmektedir. Ortamda fazla Te atomu olması Cd boşluklarının oluşmasına neden olacak bu durumda yarıiletken p-tip iletkenlik özelliği taşıyacaktır. CdTe yarıiletkenine fazladan Cd atomu katılması iletkenlik elektronlarının sayısını arttıracak bu durumda iletkenlik tipi n-tip olacaktır.

V. Lyahovitskaya ve arkadaşları doymuş Cd gazı ortamında CdTe yarıiletkenini 450-500°C de tavlayarak ve soğutarak n-tipi özelliğini kazandırdılar. Burada Cd atomları CdTe örgüsü içine girerek akseptör özelliği gösteren Cd boşluklarını ve arayer boşluklarını doldurarak

donör etkisi gösterir aynı zamanda donör özelliği gösteren tellür boşluk sayısını artırır ve iletkenlik tipinin n-tipi olmasını sağlar. Bu işlem sonucunda elektron konsantrasyonu $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçmüşlerdir. Yine doymuş Te gazı ortamında CdTe yarıiletkenini $450-500^\circ\text{C}$ sıcaklığında tavlayarak iletkenlik tipinin p-tip olma özelliğini kazandırmışlardır. Bu sıcaklıkta tavlanan CdTe bileşiğinden Cd atomları uzaklaşmakta Cd boşluklarını oluşturmaktadır aynı zamanda Te zenginliğine sebep olmaktadır bu durum yarıiletken p-tip özelliği vermektedir. Bu işlem sonucunda boşluk konsantrasyonunu $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçmüşlerdir.

CdTe yapıya sonradan yapılan katkılar yarıiletkenin iletkenlik tipini değiştirmektedir. In, Al, Cl, Br, I atomu katkısı CdTe ye n-tipi iletkenlik özelliği vermekte, P, As, Sb, Li, Na atomlarının katkısı p-tip yapmaktadır. Bununla birlikte Au, Cu ve Ag katkıları iletkenlik tipini p-tip yapmaktadır. (Sharp vd., 1990).

Üretim sürecinde veya daha sonra yapılan katkılar CdTe filmin yasak bant enerji aralığında tuzaklara ve ilave seviyelere sebep olmaktadır. Bu durum CdTe filmle yapılan elektronik aletlerin performansını etkilemektedir. Ayrıca n tip CdTe nin yüksek dirence sahip olması donör ve akseptör özellikli derin seviyelerin birbirlerini kompanse etmesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu amaçla, foton etkili geçici akım spektrometresi (PICTS) ile yapılan çalışmalarda delik tuzağının aktivasyon enerjisi 0.13eV olarak ölçülmüştür. Klor elementinin Te atomlarının yerlerine oturması donör etkisi göstermektedir ve $(V_{Cd} Cl_{Te})$ kompleksini oluşturacak şekilde ayrı ayrı iyonize olabilir ve akseptör gibi davranabilir. $(V_{Cd}^{2-} Cl_{Te}^+)$ kompleksin aktivasyon enerjisi 0.16-0.17 eV olarak ölçülmüştür (Mathew vd., 2001).

Elektro kaplama ile elde edilen CdTe filmlerde oluşan elektron ve iki tane delik tuzakların aktivasyon enerjisi PICTS yöntemiyle sırası ile 0.41eV, 0.37eV ve 0,42eV olarak ölçülmüştür (Mathew vd., 2004).

Tekli tanecik yapıdaki (Monograin) CdTe tozu $CdCl_2$ ve NaCl sıvı fazı içinde izothermal ampul içinde yeniden kristallendirilmesi iletkenliğinde değişikliğe neden olmuştur. $CdCl_2$ -NaCl karışımında Cl konsantrasyonu (10^{18} cm^{-3}) fazla ise iletkenlik n tip olup Cl_{Te} atomları ile sağlanmaktadır. Eğer Na ve Cl atomları konsantrasyonu eşit ($[Na]=[Cl]= 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) ise iletkenlikte keskin düşüş görülmektedir (Altosaar vd., 2000).

Çizelge 1.4 Çeşitli katkı ve kusurların CdTe nin bant yapısındaki enerji seviyesi (Mathew, 2003)

Katkı veya Kusur	Enerji Seviyesi (eV)
Te_i, Te_{Cd}	0.23
V_{Cd}^{2-}	0.33
h	$E_v+0.20$
e	$E_c-0.79$
Au	$E_v+0.20$
Ag	$E_v+0.20$
V_{Te}	$E_v+0.23$
V_{Cd}	0.38
Cu	0.3
Cl_{Te}^+	0.1
$V_{Cd}^{2-} Cl_{Te}^+$	0.16-0.17

$CdCl_2$ katkısı yapılan ince film yada bulk yapıdaki CdTe yarıiletkeni ile yapılan güneş pillerinin performansının arttığı gözlenmiştir. Örneğin $CdCl_2$ uygulaması yapılan güneş pili ile yapılmayan pilin açık devre gerilimi sırası ile 770mV, 615mV olarak ölçülmüştür (Dhere vd., 1996).

Genel olarak $CdCl_2$ uygulaması sonucu oluşan iyileşme, polikristal CdTe ince filmde tanecik boyutlarının artması ve kusurların etkisini azaltmak şeklinde açıklanmaktadır. PVD ile üretilen 5µm kalınlıklı CdTe yapıda tanecik boyutları ortalama 1µm den küçük olmakla birlikte $CdCl_2$ işlemi yapılmış CdTe yapıda tanecik boyutları 2-3µm arasında olduğu görülmüştür (McCandless vd., 1991). Tanecik sınırları rekombinasyon merkezi sayısını arttırmaktadır bu duruma bağlı olarak yarıiletkenin performansını azalmaktadır. $CdCl_2$ uygulaması tanecik boyutunu arttırarak tanecik sınırlarını azaltmaktadır.

Üretim sürecinde yada daha sonra oksijen uygulanmış CdTe yarıiletkeni ile yapılan güneş pillerinin performansının arttığı gözlemlenmiştir (Basol vd., 1992). Burada oksijenin akseptör özeliği gösterdiği düşünülmektedir. Bununla ilgili olarak oksijen ion implantasyonu yapılan CdTe örneklerde donör-akseptör fotoluminesans piki gözlemlenmiştir (Akimoto vd., 1992). IR çalışmasında, YMS ile oksijen ortamında üretilen CdTe filmlerde ortamdaki oksijenin konsantrasyonuna bağlı olarak filmde yük taşıyıcılarının yoğunluğu arasında bir korelasyon olduğunu belirlenmiştir (Hsu vd., 1986).

Yakın mesafeli süblimasyon tekniği ile CdTe üretimi esnasında ortamda CdO ve CdTeO₃ bileşiklerine rastlanmıştır. Bu durum Cd atomlarının oksijenle reaksiyona girdiğini ve Cd kusurlarına yol açtığını göstermektedir. Oksijen ortamında üretilen CdTe yapının yüksek iletkenliği Cd boşlukları (V_{Cd}^{2-}) ile delik (hole) üretimi ve Kadmiyum-Boşluk-Donor kompleksi ($V_{Cd}^{2-} Cl^+$) ile ilişkilendirilir (G. Jensen, 1997). Ayrıca oksijen uygulamasının tanecik sınırları etkisini azaltarak azınlık taşıyıcı ömrünü arttırdığı düşünülmektedir (Jensen vd., 1997).

Atmosfer ortamında 400°C de tavlama tavlama işlemi CdTe nin iletkenlik tipini n-tip den p-tipe çevirmektedir (Basol vd., 1992).

1.9 Metal/CdTe Eklemlerin Elektriksel Karakteristikleri

Çeşitli metallerle, CdTe yarıiletkeninin teması termodinamik çıkış işlerinin büyüklüklerine bağlı olarak Schottky eklem yada omik kontak özellik göstermektedir.

Çizelge 1.5 Çeşitli metallerin çıkış işleri (Lide, 2005)

Element	Düzlem	Çıkış işi (eV)
Ag	100	4.64
	110	4.52
	111	4.74
Au	100	5.47
	110	5.37
	111	5.31
Cu	100	5.1
	110	4.48
	111	4.94
Mo	100	4.53
	110	4.95
	111	4.55
In	Polikristal	4.09
Ga	Polikristal	4.32
Ni	100	5.22
	110	5.04
	111	5.35
Pt	Polikristal	5.64
	110	5.84
	111	5.93

CdTe yarıiletkeninin afinitesi 4.3 eV büyüklüğündedir (Movchan vd., 1999 ve Sochinski vd., basımda). p-tip CdTe de ($\rho=10^5 \text{ohm.cm}$) fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki yeri,

$E_f = E_f + 0.4$ eV dur. Böylece p-CdTe için termodinamik iş fonksiyonu $4.3 + (1.5 - 0.4) = 5.4$ eV olarak bulunur. Metallerin çıkış işi genellikle 5.4 eV den küçük olduğundan p-CdTe yarıiletkenine omik kontak yapmak zordur.

Buna karşılık çeşitli tekniklerle p tip CdTe ye omik kontak yapılabilir. p-tip CdTe yarıiletkenine Au, Cu, C ve Sb metalleri omik kontak olarak kullanılmaktadır. Fakat bu metalleri uygulanmadan önce CdTe üzerine kimyasal aşındırma uygulanmaktadır. CdTe nin kontak yapılacak yüzeyinde Te konsantrasyonun arttırmak için iki çeşit aşındırma tekniği kullanılır. Metanol içinde %2 yada % 10 luk bromine çözeltisi elde edilir ve CdTe yüzeyinde 2 yada 7 saniye bekletilir. Diğer kimyasal aşındırma yöntemleri $\text{HNO}_3/\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}$ (NP) ve 1/1 oranında $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_2\text{SO}_4$ kimyasal çözeltileri ile yapılmaktadır. Yine bu aşındırma işleminde amaç Cd atomlarının CdTe yüzeyinden uzaklaştırarak Cd boşlukları meydana getirmek ve Tellurca zengin yüzey elde etmektir (Dzhafarov vd., 2005 ve Viswanathan vd., 2004). Bu işlem yüzeyin p tip özelliğini arttırmakta ve omik kontak özelliğini iyileştirmektedir.

Kimyasal aşındırma sonrasında kontak metalleri yüzeye kaplanır. Kontak metali olarak Au, Ag, Cu, Au-Cu, ve Cu-C metal ve alaşımları kullanılır. Bunun yanında Li katkılı Altın kontak, ZTe:Cu kontak ve HgTe (Viswanathan vd., 2004) ve Sb_2Te_3 (Batzner vd., 2001) alaşımları omik kontak olarak kullanılır. Bununla birlikte Mo ve C elementleri de omik kontak olarak kullanılmıştır.

n-tip CdTe yarıiletkenine omik kontak nispeten daha kolaydır. In/Ga alaşımı (Dharmadasa vd., 1987) paslanmaz çelik altlık kullanılmaktadır (Herrmann vd., 1999) ya da Al altlık kontak metali olarak kullanılmaktadır.

n-tip CdTe yarıiletkeni ile Au, Cu, Ag metalleri temasta olduğunda Schottky diyot elde edilmektedir. Bu eklemlerle ilgili çok çalışma vardır. Mathew (2002), yaptığı çalışmada bu eklemin opto-elektronik alet olarak kullanılacağını göstermiştir. Mathew (2002) elektro-kaplama tekniği ile elde ettiği n-CdTe yarı iletkenine Au metalini kaplayarak schottky diyot elde etmiştir, aydınlıkta açık devre gerilimi $V_{oc} = 0.37$ V ve kısa devre akımının $I_{sc} = 5.6 \times 10^{-5}$ A olduğunu doluluk oranını $FF = 0.5$ ve ideallik β faktörünün karanlıkta 1.5 aydınlıkta 1.2 olarak ölçmüştür. Benzer bir çalışma Rakhshani vd. (1998) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada yük taşınma mekanizmasını akım gerilim ölçümlerinden, ileri yönde gerilim uygulamada, yüksek gerilimde termoiyonik emisyon ile, düşük gerilimde ise uzay yükü sınırlaması ile olduğu şeklinde açıklamışlardır. Ters yön gerilim uygulanmasında ise Schottky engelinin yük

taşınması işleminde baskın olduğunu belirlemişlerdir. İdeallik katsayısı 1.3 ile 1.5 olarak ölçülmüşlerdir.

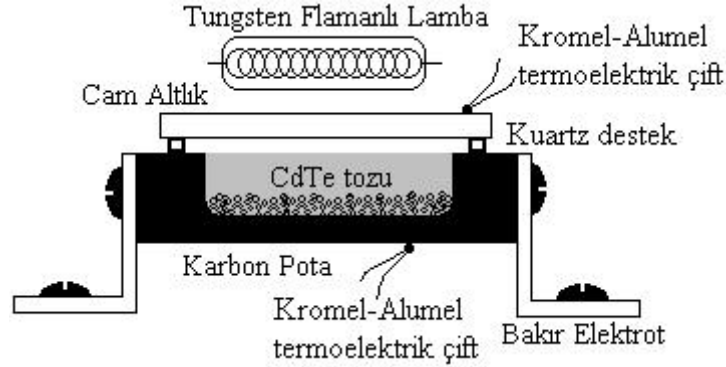
1.10 Tavlamanın Ag,Au/CdTe Eklemlerin Özelliklerine Etkisi

Al-Shibani (2002) 673 K sıcaklıkta farklı sürelerde (0.5 ile 4 saat) tavladığı Au/CdTe eklemlerin karakteristiğini bozulduğunu ideallik katsayısının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişimini, CdTe yapıda Te atomlarının Cd atomlarına göre daha kolay uzaklaşabileceğinden stokiometresinin değişimi ile ilişkilendirmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 CdTe Filmlerin CSS Yöntemleri ile Hazırlanması.

CdTe bileşiği 550°C ile 620°C sıcaklıkları arasında süblimleşme özelliğine sahiptir. Deneylerde kullanılan, cam altlık üzerine kaplanılan CdTe ince filmler yakın mesafeli süblimasyon (Close-Spaced Sublimation) (CSS) yöntemi ile elde edildiler. Aldrich firması tarafından üretilen %99.998 saflıkta ve parçaçık boyutu ortalama 6.21 mikron olan toz halindeki CdTe yarıiletkeni karbondan hazırlanmış potaya yerleştirildi, (Şekil 2.1). Cam altlıklar karbon potadan yaklaşık 2-3 mm uzağa yerleştirildi. Karbon potadan kontrollü olarak elektrik akımı geçirildi. Elektrik akımı nedeni ile karbon pota gerekli sıcaklığa ulaşarak CdTe tozun süblimleşmesi sağlandı. Süblimleşme sürecinde cam altlıklar lamba ile 450°C sıcaklığa kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıkta sabit kalması sağlandı.



Şekil 2.1 Cam altlık üzerine ince film CdTe kaplamak için kullanılan yakın süblimleşme yöntemi.

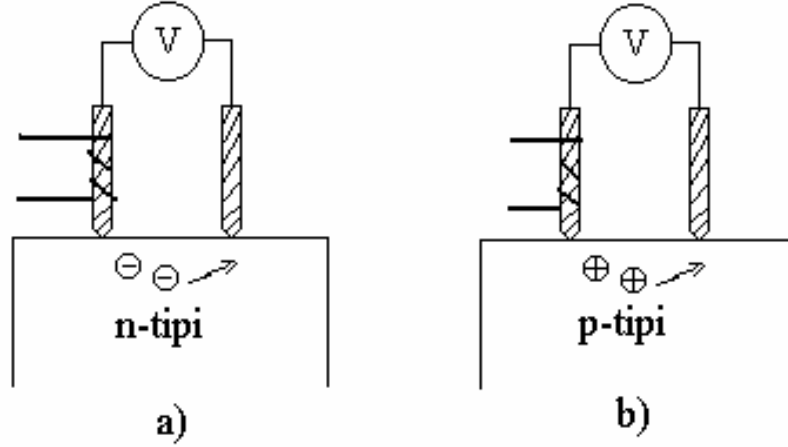
Tüm sistem yaklaşık olarak 10^{-4} torr vakumda bulunmaktadır. Sıcaklıklar K-tip termoelektrik çift ile okunmuştur.

Elde edilen CdTe ince filmlerin kalınlığı 3-5µm aralığında olup kalınlık süblimleşme sıcaklığı ve kaplama süresi ile değişmektedir.

2.2 CdTe Filmlerin İletkenlik Tipi Ölçümleri

Üretilen ince film CdTe örneklerin iletkenlik tipleri *termal elektro-motor kuvvet* yöntemi kullanılarak ölçüldü. Bu yöntemde örneğe, biri sıcak diğeri de oda sıcaklığında olmak üzere iki prob dokundurularak oluşan termal elektro-motor kuvvetin voltmetre ile ölçülmesi ile yarıiletkenin iletkenlik tipi belirlenir (Şekil 2.2). Sıcak prob civarında kinetik enerji kazanan serbest yük taşıyıcıları soğuk bölgeye difüz edeceklerdir. Bu şekilde oluşan akım yönü

iletkenlik tipini belirleyecektir. Eğer yarıiletken n tipi ise elektronlar soğuk bölgeye gidecekler bu durumda soğuk prob negatif sıcak prob ise pozitif olarak kutuplanacaktır. Benzer şekilde yarıiletkenin iletkenlik tipi p ise delikler soğuk bölgeye difüzyon edeceklerdir. Bu durumda soğuk prob pozitif, sıcak prob negatif olarak kutuplanacaktır.



Şekil 2.2 Termal EMK yöntemi ile (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov 1998).

Üretilen numunelerin iletkenlik tipi, toz CdTe nin içindeki Cd ve Te oranına bağlı olarak ya n-tip veya p-tip ayrıca, sonradan In katkı yapılarak n-tip, CdCl₂, Au, ve Ag katkısı ile p-tip olarak ölçüldü.

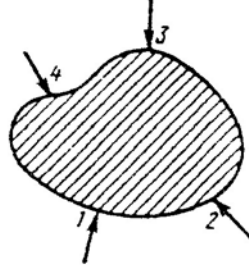
2.2.1 CdTe Filmlerin Özdirenci ve Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonu Ölçümü

Üretilen numunelerin özdirenç ölçümleri Van der Pauw metodu ile yapıldı. Bu ölçüm metodu, kullanılan numunenin geometrisinin ve kontakların birbirine göre olan konumlarının ölçüm sonucuna etkisini asgariye indirger.

Van der Pauw tekniği ile özdirenç ölçünü yapabilmek için dört şartın sağlanmış olması gerekir.

- Örnek düzlem şeklinde ve uniform kalınlıkta olmalı
- Örnek içinde izole olmuş delikler olmamalı
- Örnek homojen ve isotropik olmalı
- Tüm dört kontak örneğin kenarlarında olmalı (J. G. Webster, 1999).

Serbest formda olan Şekil 2.3'deki gibi örnek üzerine yerleştirilen dört omik kontakta önce 1 ve 4 numaralı kontaklardan akım geçirilir ve aynı zamanda 2 ve 3 numaralı kontaklardan gerilim okunur ,



Şekil 2.3 Van der Pauw metodu ile öz direnç ölçümlerinde serbest plaka

$$R_1 = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (2.1)$$

direnci hesaplanır, daha sonra 1 ve 2 numaralı kontaklardan akım geçirilir aynı zamanda 3 ve 4 numaralı kontaklardan gerilim okunur ve,

$$R_2 = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (2.2)$$

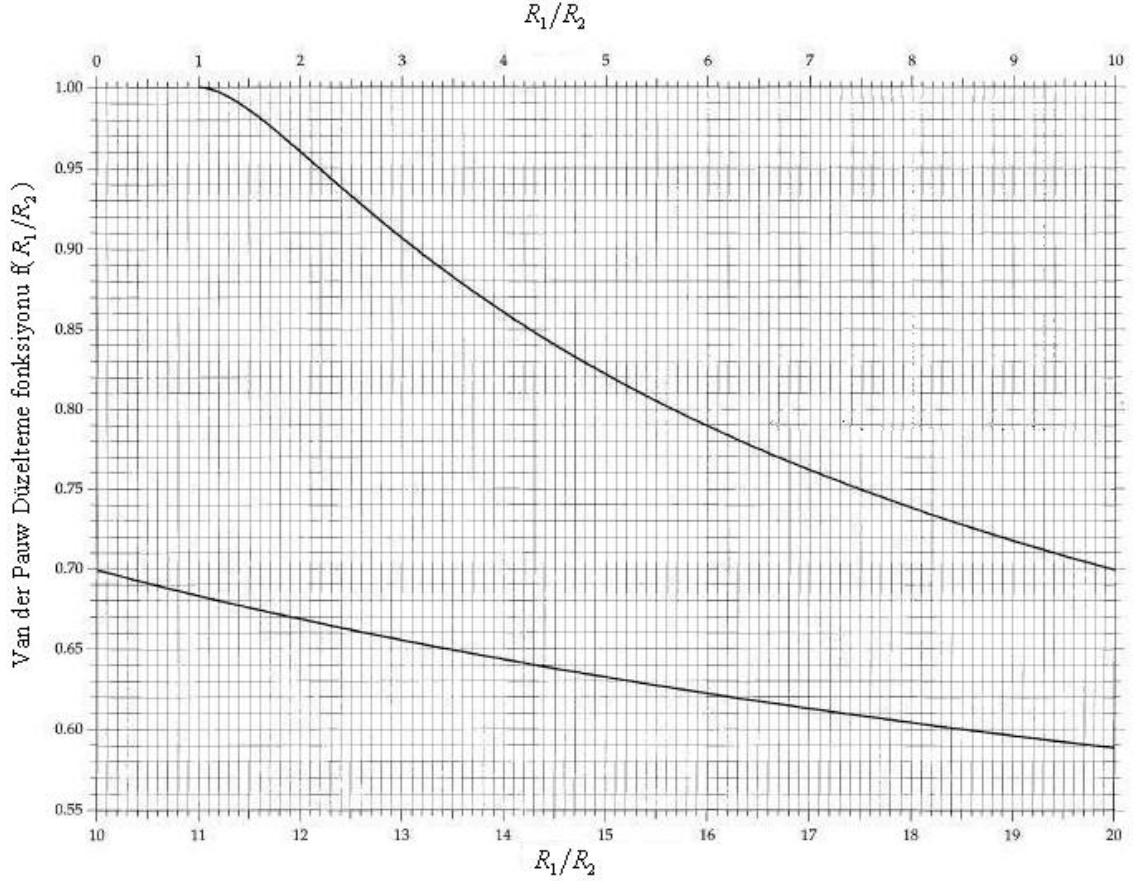
direnci hesaplanır.

Van der Pauw teorisine göre direncin bu iki değerinden, örneğin öz direnci

$$\rho = \frac{\pi b}{\ln 2} \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) f \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

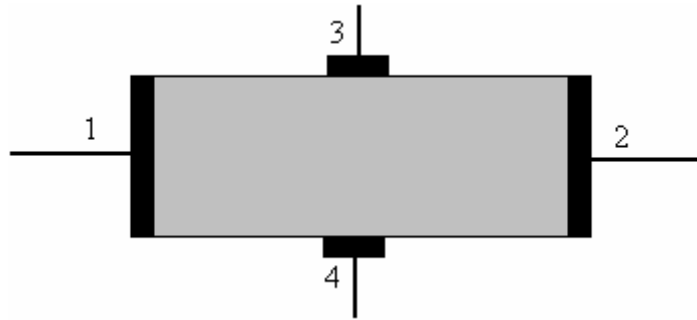
ifadesinden bulunur. Burada b numunenin kalınlığı, $f \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$ düzeltme fonksiyonudur.

Düzeltilme fonksiyonu R_1 ve R_2 dirençlerinin oranına bağlı olarak değişir. Bu ilişkinin grafiği Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Örneğe yapılan kontak alanı örneğin alanına göre nispeten küçük olmalıdır fakat pratikte bu mümkün olmadığından düzeltme fonksiyonu ile bu durum ortadan kaldırılmaktadır.



Şekil 2.4 Düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 oranına karşı grafiği (J. G. Webster, 1999).

İnce film CdTe örneklerin yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ve mobilitelerinin ölçümü için Hall ölçümleri ile yapıldı. Şekil 2.5'deki gibi formda kontakları hazırlanan ince film numunelerin öz direnci Van der Pauw yöntemi ile ölçüldükten sonra numune 6400 Gauss'luk magnetik alan şiddetine sahip manyetik alana yüzeyi dik olacak şekilde yerleştirildi. Bu durumda 1 ve 2 numaralı kontaklardan akım geçirildi ve 3-4 numaralı kontaklardan Hall gerilimi okundu.



Şekil 2.5 Hall ölçümü için kontakların konumu.

Yapılan kontakların yeterince simetrik olmaması ve numunenin isotropisinin tam olmaması nedeni ile hall gerilimde parazit gerilimler oluşmaktadır. Oluşan bu parazit gerilimlerin ölçüm sonucuna etkisini azaltmak için Hall gerilimi numuneden geçirilen iki akım ve iki manyetik alan yönü için okunur ve ortalaması alınır. Parazit etkilerden arınmış Hall gerilimi,

$$V_H = \frac{1}{4} [V_{H1}(I_+, B_+) + V_{H2}(I_-, B_+) + V_{H3}(I_+, B_-) + V_{H4}(I_-, B_-)] \quad (2.4)$$

formülünden hesaplandı. Bu ölçüm sonuçlarından Hall sabiti,

$$R_H (cm^3 C^{-1}) = 10^8 \frac{V_H b}{IB} \quad (2.5)$$

buradan numuneye ait yüktaşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite,

$$n, p (cm^{-3}) = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R_H} \quad (2.6)$$

$$\mu = R_H \sigma = R_H \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

bağıntılarından hesaplandı. burada n, p sırası ile n-tip veya p-tip numunenin yük taşıyıcı konsantrasyonu, σ iletkenliktir.

2.3 CdTe Filmlerin ve Ag(Au)/CdTe Eklemlerin XRD Yöntemi ile Analizi

Cam altlık üzerine üretilen ince film CdTe ve katkılı CdTe numunelerin yapısal analizi “Philips Pan Analytical X Pert Pro” ve “RigakuD/Max-IIIC” difraktometreleri ile ölçüldü. Bu analizde $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ dalga boyunda CuK_{α} ışını kullanıldı. Sistem Şekil 2.6’da gösterilen geometride çalışmaktadır. Bu ölçümde yapısal analizde, düzlemler arası mesafe,

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.8)$$

formülü ile hesaplandı. Bu denklemde, θ yarıiletken örgü üzerine düşen X-ışını ile yarıiletkenin yüzeyi arasındaki açı, λ yüzey üzerine düşen X-ışının dalgaboyu, d ise örgü düzlemleri arasındaki mesafe olup difraktometre tarafından $\pm 0,003 \text{ \AA}$ luk hata payı ile yapıldı.

Düzlemlere ait (h,k,l) miller indisleri belirlendikten sonra yapıya ait örgü parametresi a nın belirlenmesinde,

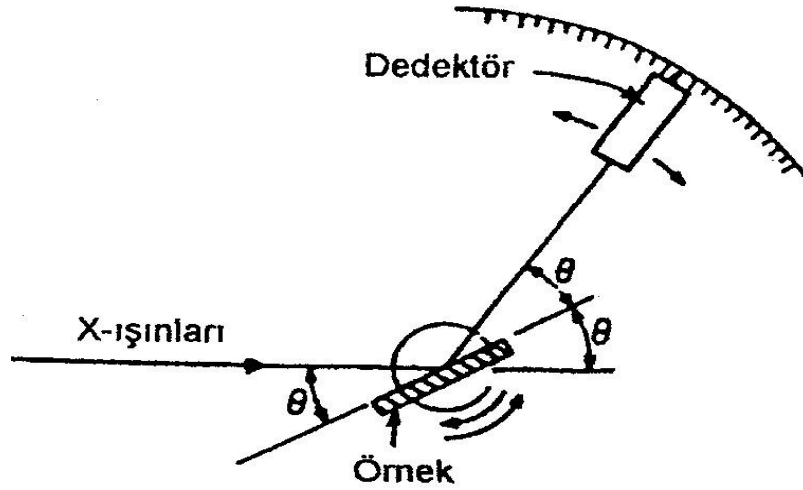
Kübik yapı için,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.9)$$

formülü, hekzagonal yapı için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.10)$$

formülü kullanıldı.



Şekil 2.6 XRD difraktometre geometrisi (Caferov, 1998).

Polikristal yapıdaki malzemelerdeki tanecik büyüklüğü Debye-Scherrer bağıntısı ile belirlendi. Debye-Scherrer bağıntısı (Kabak, 2004 ve Cullity, 2001),

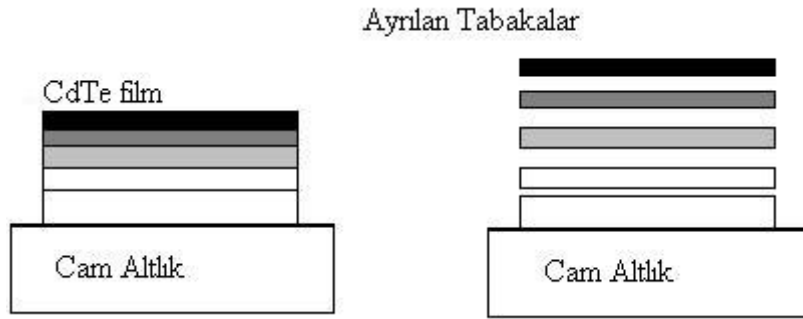
$$T = \frac{0,9\lambda}{B \cos(\theta)} \quad (2.11)$$

şeklindedir.

Burada λ X-ışınının dalga boyu, B ilgilenilen yapıya ait XRD pikin yarı yüksekliğinin tam açısal genişliğinin (FWHM) radyan cinsinden ifadesidir. θ ilgilenilen pikin Bragg yansıma açısıdır ve T taneciklerin ortalama çapını vermektedir.

2.4 CdTe'nin Kompozisyonu ve Katkı Atomlarının Konsantrasyon Dağılımının XRF Yöntemiyle Analizi.

Cam altlık üzerine kaplanan CdTe ince filmlerin üzerine katkı atomları (Ag ve Au) elektron demeti buharlaştırma tekniği ile kaplandı. Üretilen CdTe ince filmlerin kalınlıkları $4\mu\text{m}$ civarındadır. Cam altlık üzerine kaplanan CdTe ince filmlerin kalınlıkları mikrometre ile ölçüldü. Kaplanan metallerin kalınlıkları "Leybold Inficon Deposition Controller" ile yapıldı. Numunelere vakumda farklı sıcaklıklarda, eşit sürede termal tavlama verildi ve katkı atomlarının CdTe içine difüzyonu sağlandı. CdTe üzerinde kalan, difüzyon yapmamış katkı metali %40 lık HNO_3 asit çözeltisi ile temizlendi ve örnekler distile su ile asitten arındırıldı. Sırası ile, CdTe üzerine metaller kaplandıktan hemen sonraki, difüzyon işlemi ve asitle temizleme işleminden sonra katkı metalinin konsantrasyona bağlı X-ışını pikleri XRF cihazı ile ölçüldü. Bu ölçümlerde amaç kaplanan katkı atomlarının sayısı ile XRF piki şiddetini ilişkilendirmektir. XRF pikinin şiddeti filmde bulunan katkı metali ile doğru orantılıdır. XRF ölçümlerinde K_α geçiş ışınları şiddetleri hesaplamalarda kullanıldı. Difüzyon sonrasında $1\mu\text{m}$ lik elmas macun parlatıcı ile örnekler üzerinden ince film şeklinde CdTe tabakaları çıkarıldı ve her bir tabakanın çıkarılma sonrası örnekteki Ag ve Au için $K_{\alpha 1}$ pikinin şiddeti XRF cihazı ile ölçüldü ve CdTe kompozit konsantrasyonu hesaplandı (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 $1\mu\text{m}$ çaplı elmas parlatıcı ile CdTe ince filmde tabakaların ayrılması.

Bu şekilde farklı sıcaklıklarda katkı metalinin CdTe kalınlığı boyunca difüzyonunun profili elde edilmiş oldu. Elde edilen bu profillerden Ag ve Au katkı metallerinin CdTe ince film polikristal yarıiletkeni içine difüzyon katsayısı ve çözünürlüğü (solubilitesi) hesaplandı

2.5 Katkıların CdTe Filmlerinde Çözünürlük Analizi.

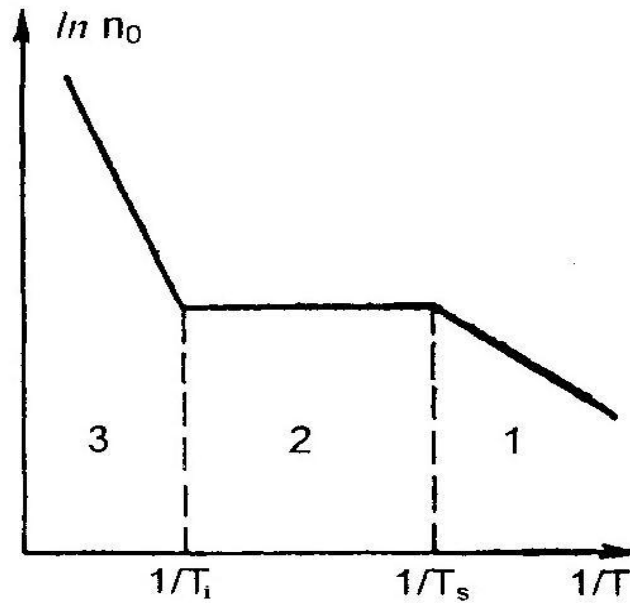
Çözünürlük (solubilité), katkı atomlarının çözücü (ev sahibi) atomları arasına yerleşebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Difüzyon işlemi ile çözünürlük doğrudan birbirleri ile

alakalı iki fiziksel olaydır. Her iki işlem de çözücü yapıdaki boşluklar ve katkıların çözücü atomlara bağlanması için gerekli olan enerji ile alakalıdır (Boltalks, 1960). Bu nedenle de her iki özelliğin birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

Ag nin CdTe de çözünürlüğünü hesaplamak için, farklı sıcaklıklarda (350-400°C) ve eşit sürede (5 dakika) tavlama verilen örneklerde katkı atomlarının difüzyonu sağlandı ve bu numuneler içinde katkı atomlarının örnek içinde konsantrasyonu XRF ölçümü ile belirlendi. Çözünen katkı atomlarının atom sayısı bakımından örnek içindeki konsantrasyonu solibilitedir. Böylece her bir sıcaklık için bu konsantrasyon hesaplandı. Sıcaklık konsantrasyon grafiğinden katkı atomlarının CdTe de sıcaklığa bağlı çözünürlük bağıntısı elde edildi.

2.6 Katkıların Enerji Seviyelerinin İletkenlik-Sıcaklık Ölçümlerinden Belirlenmesi

Katkılı yarı iletkenlerde yük taşıyıcı konsantrasyonu, katkı konsantrasyonuna ve malzemenin sahip olduğu sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Tipik katkılı yarı iletkende yük taşıyıcıların sıcaklığa bağlı konsantrasyonu Şekil 2.8'deki gibidir.



Şekil 2.8 Katkılı yarıiletkenlerde yük taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklığa bağlı değişimi (Caferov, 1998).

1. Bölge, düşük sıcaklık bölgesi olup katkının katkının hafif iyonlaşma bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektron konsantrasyonu sıcaklıkla üstel olarak değişir.

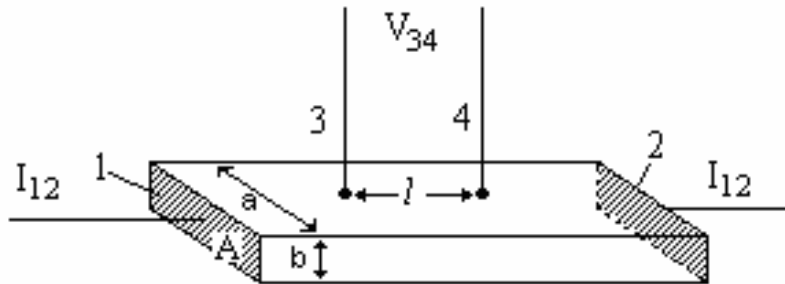
$$n = N_c \exp\left[-\frac{(E_c - E_d)}{2k_B}\right] \quad (2.12)$$

2. Bölge donör katkılarının katkılarının tam olarak iyonlaştığı bölgedir. Burada ($n=N_d$) eşitliği söz konusudur.

3. Bölge yüksek sıcaklık bölgesi olup katkılı yarıiletkenden özden yarıiletkene geçiş durumu olmaktadır. Fermi seviyesinin konumu özden yarıiletkenin konumu ile üst üste gelir. Yük taşıyıcıların konsantrasyonu (2.11) bağıntısına uyacak şekilde üstel olarak artmaktadır.

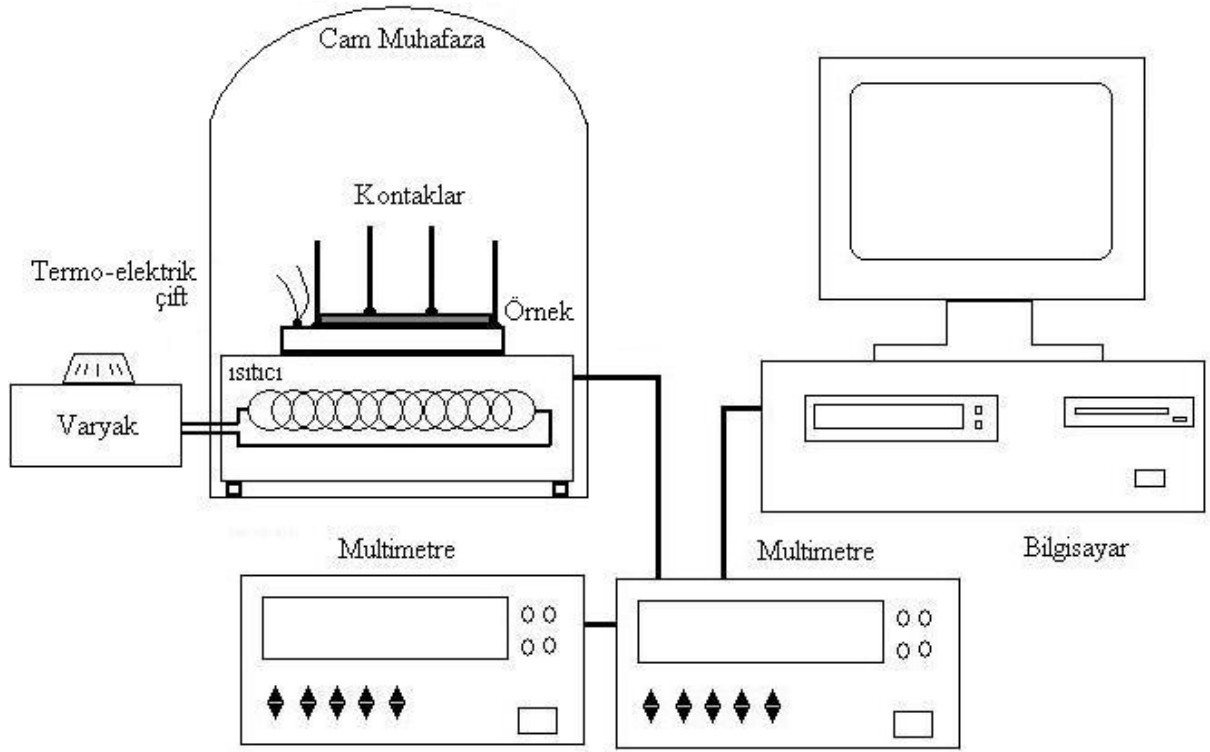
$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.13)$$

Ag ve Au katkı atomlarının CdTe nin enerji bant diyagramında katkı enerji seviyesini bulmak için iletkenlik sıcaklık ölçümü yapıldı. Bu deneyde Ag ve Au CdTe ye difüzyonla katkılandıktan sonra numune yüzeyi üzerine Şekil 2.9'da gösterildiği gibi dört kontak olarak yapıldı.



Şekil 2.9 İki-problu yöntemle öz direnç ölçüm devresi (Caferov, 1998)

Örnek sıcaklığı ayarlanabilir ısıtıcı üzerine yerleştirildi ve sistemin sıcaklığı dış hava akımlarından etkilenmemesi için numune cam fanus içine yerleştirildi (Şekil 2.10). Isıtıcının sıcaklık kontrolü bir variak ile yapıldı.



Şekil 2.10 İletkenlik sıcaklık ölçümünde kullanılan sistem

Numune sıcaklığı K-tip termoelektrik çift ve buna bağlı elektronik devre yardımı ile okundu deney süresince ölçüm verileri bilgisayara kayıt edildi. Devreye uygulanan akım ve gerilim “Keithley 2000” marka dijital multimetrelerle bilgisayar kontrollü olarak okundu.

Numuneye sabit gerilim uygulandı ve kontaklardan akım ve gerilim okundu ve örneğin sıcaklığı yavaşça doğrusal olarak artırıldı. Sıcaklığın artırılmasından sonraki her bir termik dengede numune sıcaklığı, numunenin bu sıcaklıkta içinden geçen akımı ve üzerindeki gerilimi bir bilgisayar programı yardımı ile eş zamanlı olarak okundu ve kayıt edildi. Bu verilerden örneğin iletkenliği

$$\sigma = \frac{\ell I}{A V} \quad (2.14)$$

formülünden hesaplandı, burada A numunenin yanal kontağının alanı, V numune üzerinde okunan gerilim, I (1-2kontaklar) numune içinden geçen akım ve ℓ , 3- 4 numaralı kontaklar arası mesafe (Şekil 2.9).

İletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişen grafiği yarı logaritmik olarak çizildi ($\log(\sigma) = f(\frac{10^3}{T(K)})$). Grafiğin eğiminden katkı seviye enerjisi ΔE_d ve yasak bant enerjisi ΔE_g ,

$$\Delta E_d \approx 0,4 \frac{\partial \log(\sigma)}{\partial (10^3 / T)} \quad (2.15)$$

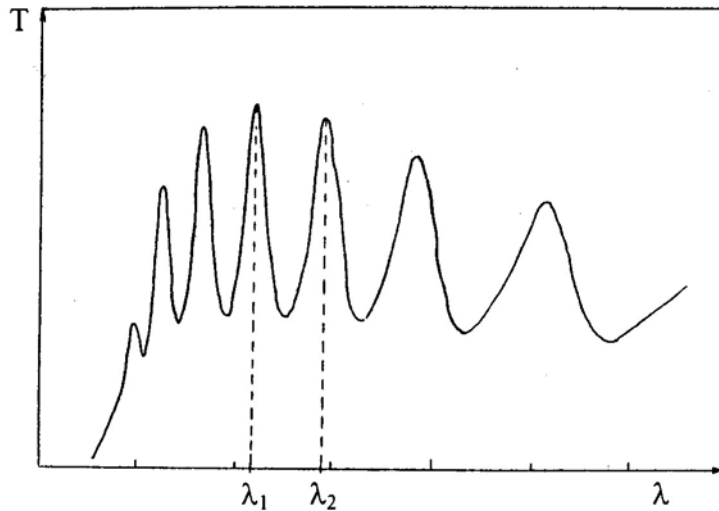
$$\Delta E_g \approx 0,4 \frac{\partial \log(\sigma)}{\partial (10^3 / T)} \quad (2.16)$$

formüllerinden hesaplandı.

2.7 CdTe Filmlerin Yasak Bant Genişliğinin ve Katkılarının Enerji Seviyelerinin Optik Geçirgenlik Spektrumlarından Belirlenmesi

Katkılı ve katkısız CdTe örneklerin optik geçirgenlik spektrumları “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi ile 300-1100nm dalga boyu aralığında ölçüldü. Bu ölçümden faydalanarak üretilen CdTe filmlerin kalınlıkları ve absorpsiyon katsayıları hesaplandı.

Optik geçirgenlik spektrumu ölçümlerinde ince filmde girişim olayı meydana gelmektedir (Şekil 2.11) bu girişim sonucu oluşan maksimum ve minimum girişim desenlerinden faydalanarak filmlerin kalınlıkları hesaplandı.



Şekil 2.11 Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).

Filmlerin kalınlıklarının hesabı için,

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (2.17)$$

formülü kullanıldı. Buradaki n filmin kırılma indisi (CdTe için n= 2.69), d filmin kalınlığıdır. λ_1 ve λ_2 optik geçirgenlik grafiğinde girişim nedeni ile oluşan ardışık iki tepenin dalga boylarıdır.

Optik geçirgenlik grafiğinden absorpsiyon grafiğini elde edebilmek için,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1 - R^2) \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 (-2\alpha d)} \quad (2.18)$$

burada $\alpha \gg 1$ durumunda,

$$T = \frac{I}{I_0} = (1 - R^2) \exp(-\alpha d) \quad (2.19)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{(1 - R)^2}{T} \right) \quad (2.20)$$

formülü kullanıldı. Burada I_0 ve I sırası ile örneğe gelen ve örnekten çıkan ışık şiddetleri, α absorpsiyon katsayısı, R örneğin yansımaya katsayısı ve d örneğin kalınlığı T ise yüzde optik geçirgenliktir. Yansımaya katsayısı,

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (2.21)$$

formülünden bulunur. CdTe için R=0.213 dür. Monokromatörden gelen ışığın dalgaboyu ile foton enerjisi arasındaki bağıntı,

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (2.22)$$

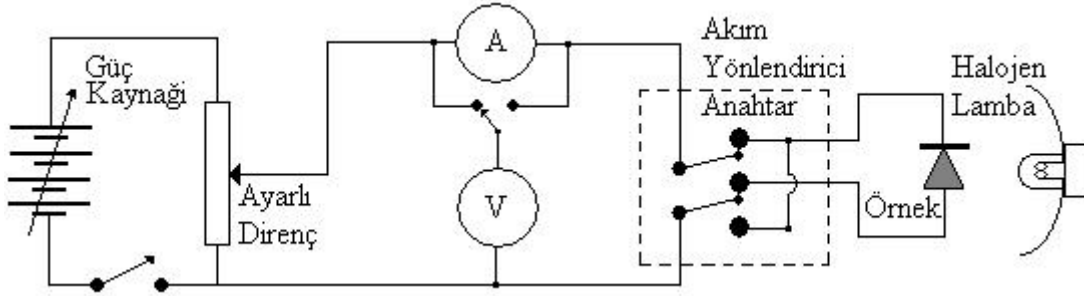
şeklindedir. Temiz CdTe ve katkılı CdTe örneklerin yasak bant genişliği ve katkı seviyesinin ölçümü için, üretilen ince film CdTe örneklerin yüzeyi 1µm çaplı karbon parlaticı ile parlatıldıktan sonra maske ile spektrometre içine yerleştirildi ve geçirgenlik spektrum ölçümü yapıldı. Yasak bant genişliğini ölçmek için 300-1100nm dalga boyu aralığında (%T) geçirgenlik ölçümü yapıldı CdTe direk bant geçişli yarıiletken (Chopra, 1983) olduğundan $[(\alpha \cdot hv)^2, hv]$ grafiği çizildi. Direkt bant geçiş ifadesi,

$$\alpha^2 \cdot (h\nu)^2 = B^* (h\nu - E_g) \quad (2.23)$$

gereği apsis eksenini (foton enerjisi) extrapole olarak kesen nokta CdTe nin yasak bant genişliği olarak alındı. Üretilen CdTe numunelerin oda sıcaklığındaki yasak bant genişliği 1.48 ve 1,5 eV arasında ölçüldü.

2.8 Metal/CdTe Eklemlerin I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi

Üretilen ve GaIn sıvı metali ile omik kontak yapılan Ag/nCdTe, Ag/pCdTe ve Au/nCdTe, Au/pCdTe eklemlerin akım gerilim karakteristikleri Şekil 2.12 ile verilen ayarlı elektrik devresi ile ölçüldü. Örnekler oda sıcaklığında, karanlıkta ve kalibre edilmiş güneş simülatörü ile aydınlıkta ölçüldü. Güneş simülatörü olarak 50Watt 12 Volt luk halojen lamba kullanıldı.



Şekil 2.12 Akım gerilim ölçümleri için kullanılan elektrik devresi.

Akım gerilim ölçümlerinde 10^{-5} Volt ve 10^{-8} A hassasiyetli “thurlby 1503” dijital multimetreler kullanıldı. Akım gerilim ölçümlerinden ϕ_b engel yüksekliği, I_s doyma akımı, β ideallik katsayısı hesaplandı.

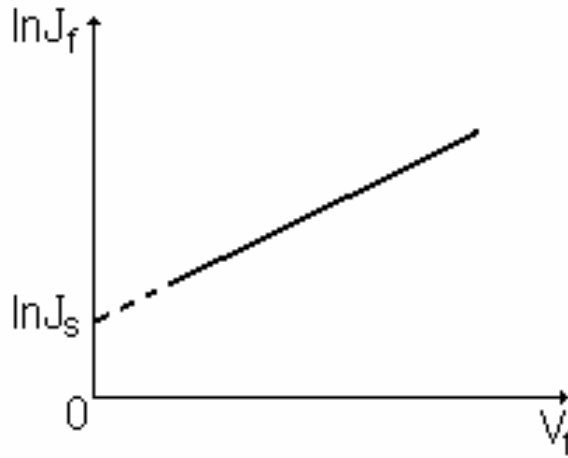
Metal/Yarıiletken kontakta geçen doğru akım aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$J_f = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right] \approx J_s \exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) \quad (2.24)$$

Eğer doğru gerilim sıfıra yaklaşırsa ($V \rightarrow 0$) bu durumda

$$J_f \approx J_s \quad (2.25)$$

olur. Bunun için ileri yön akım yoğunluğu-gerilim $(\ln J_f - V_f)$ grafiği çizildi (Şekil 2.13) ve buradan eğrinin $V_f = 0$ da, $\ln J_f$ eksenine ile kesiştiği noktada, $\ln J_f|_{V=0} = \ln J_s$ olur.



Şekil 2.13 Doğru akım yoğunluğunun gerilimle değişim grafiği.

Ag/CdTe ve Au/CdTe eklemlerin engel yüksekliğinin (φ_b) bulunması için

$$\varphi_b = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{A^* T^2}{J_s} \right) \quad (2.26)$$

bağıntısı kullanıldı (Sze, 1936). Burada A^* , Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi m^* k^2}{h^3} (A \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-2}) \quad (2.27)$$

formülünden hesaplanır. Bu yöntem sadece bir sıcaklıktaki (oda sıcaklığında) ölçülen $J_f - V$ karakteristiğinden elde edilen J_s den engel yüksekliğini hesaplamak için kullanıldı.

İdeallik Katsayısının (β) belirlenmesi için $\ln J_f - V$ grafiği çizildi ve eğimi $\frac{d(\ln J_f)}{dV}$ hesaplandı ve sonra denklem (2.24) kullanılarak ideallik katsayısı (β) bulundu.

$$\beta = \frac{e}{kT} \left[\frac{d(\ln J_f)}{dV} \right]^{-1} \quad (2.28)$$

(Sze, 1936).

2.9 Metal/CdTe Eklemlerin C-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi.

Metal-yarıiletken Schottky eklem düzlemsel kondansatöre benzetilebilir. Schottky kontağında meydana gelen kapasitans

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_o S}{L_o} \quad (2.29)$$

Şeklindedir. Burada S eklemin alanı, ε yarıiletkenin dielektrik katsayısı, ε_o boşluğun dielektrik sabiti L_o arınma bölgesinin genişliği olup,

$$L_o = \sqrt{\frac{2\varepsilon \varepsilon_o (\phi_m - \phi_s)}{e^2 n}} \quad (2.30)$$

ifadesi ile belirlenir . (2.27) bağıntısında yerine konursa

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_o e n}{2(\phi_m - \phi_s)}} \quad (2.31)$$

şeklini alır. Schottky diyotlarında difüzyon kapasitansı yoktur sadece engel kapasitansı mevcuttur. (2.29) bağıntı gereği C-V ölçümlerinden arınma bölgesi genişliği L_o bulunabilir. Schottky diyoduna dışarıdan gerilim uygulanmadığı durumda ($V=0$ denge durumu), metal-yarıiletken geçiş bölgesinde bariyer yüksekliği $e\varphi_K = \phi_m - \phi_s$ büyüklüğündedir. Dışarıdan gerilim uygulandığında ise geçiş bölgesine düşen potansiyel,

$$\varphi = \varphi_K - V \quad (2.32)$$

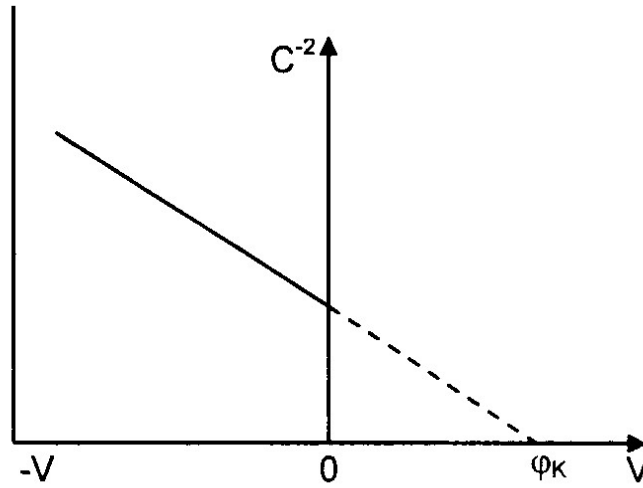
şeklindedir. Bu durumda engel kapasitesi,

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e n}{2(\phi_K - V)}} \quad (2.33)$$

şeklini alır. Buradan konsantrasyon,

$$n = \frac{2}{\varepsilon \varepsilon_0 e S^2} \left[\frac{d}{dV} \left(\frac{1}{C^2} \right) \right]^{-1} \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilebilir. Schottky kapasitansının gerilimle değişimi grafiğinde eğim engel bölgesindeki yük miktarını, eğrinin gerilim eksenini kestiği nokta ise engel yüksekliğini vermektedir (Şekil 2.14)



Şekil 2.14 Schottky diyodun kapasitans-ters gerilim karakteristiği (Caferov, 2000)

Metal/pCdTe ve metal/nCdTe örneklerin kapasitans gerilim ölçümleri Hawlett Packard marka kapasitans metre ile yapıldı. Bu ölçümlerde örneklerin ileri ve ters yöndeki gerilimlere karşı kapasiteleri ölçüldü ve $(1/C^2-V)$ grafiği çizildi. Çizilen grafikten gerilimin sıfır olduğu nokta ($V=0$) daki kapasite değerinde engel genişliği d ,

$$d = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C} \quad (2.35)$$

yük taşıyıcı konsantrasyonu $N(x)$

$$N(x) = \frac{1,4 \times 10^8}{\varepsilon \varepsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} \quad (2.36)$$

formüllerinden hesaplandı. Burada S (cm^2) eklemin yüzey alanı ve CdTe için $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-2} \text{ pF/cm}$, $\varepsilon = 9,65$ dır. Sabitler formülde yerine yazıldığında konsantrasyon ifadesinin son şekli,

$$N(x) = \frac{1,6 \times 10^8}{S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} (\text{cm}^{-3}) \quad (2.37)$$

biçimindedir.

2.10 CdTe Filmlere Omik Kontakların Yapılması

Üretilen yarıiletkenleri dış dünyaya bağlayabilmek veya elektriksel özelliklerini ölçebilmek için yapılan omik kontaklar aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Caferov, 1998).

- a) Kontakların akım-gerilim karakteristikleri doğrultucu özellikte olmamalıdır diğer bir ifade ile kontak direnci akım yönüne bağlı olmamalıdır.
- b) Kontak direnci akımın büyüklüğüne bağlı olmamalıdır.
- c) Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük olmalıdır.
- d) Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.
- e) Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir.

Kontak üzerine düşen gerilimin kontak içinden geçen akıma oranı kontak direnci olarak tanımlanır.

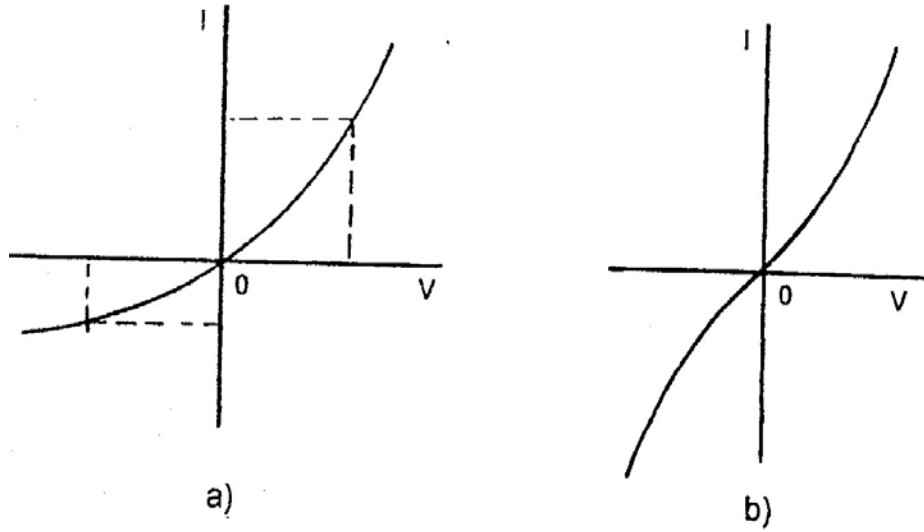
$$R_{OK} = \frac{V}{I} \quad (2.38)$$

Kontak direnci ne kadar az ise kontak o kadar omik olmaktadır. Omik kontaklarda direnç kontak alanına bağlı olduğundan kontakta geçen akımın yoğunluğu göz önünde bulundurulur ve direnç kontak öz direnci olarak tanımlanır.

$$\rho_{OK} = \frac{V}{J} \quad (2.39)$$

birimi (ohm.cm^2) dir. İleri ve ters yöndeki akımların oranı kontak doğrultma katsayısı olarak tanımlanır ve ideal bir omik kontakta bu oran bir değerindedir. Farklı özellikteki iki kontakın

akım gerilim grafiği Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri. a) küçük doğrultmaya sahip omik kontak, b) direnci gerilime bağlı omik kontak (Caferov, 1998).

Yarıiletken omik kontak olarak yapılacak metalin seçiminde aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır.

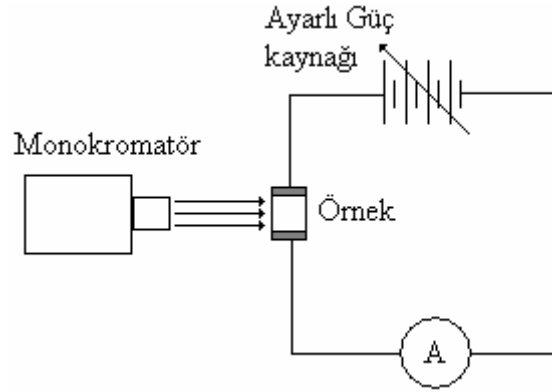
- n-tipi yarıiletken kullanılarak yapılacak metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha küçük olmalıdır ve metal bu yarıiletken için donör özelliği göstermelidir.
- p-tipi yarıiletken kullanılarak yapılacak metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden büyük olmalıdır ve kullanılan metal bu yarıiletken için akseptör özelliği göstermelidir.

Omik kontak yapmak için çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlar basınçla omik kontak yapma, Eritme yöntemi ile Elektrolitik çökme, Kimyasal çökme, Isısal basınçla yapılan kontak yöntemleri en çok kullanılan omik kontak yöntemleridir.

Ürettiğimiz n-CdTe ve p-CdTe yarıiletkenine Ga/In kontak malzemesi kullandık. Ga/In karışımını CdTe filmine kaplamaktan önce, filmin yüzeyi $\text{HNO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$ (NP) asitler karışımı ile dağlama yapıldı (etch). Bu kimyasal aşındırma işlemin amacı, CdTe filmin yapısını bozmak, yani burada Cd ve Te atomları arası bağları zayıflatmak ve kırmaktır. Neticede bu kopmuş bağlar vasıtası ile yük taşıyıcıları (elektron veya delikler) tunel mekanizması ile metalden CdTe filmine geçebilirler. Bu yöntemle hazırladığımız (Ga/In)/nCdTe ve (Ga/In)/pCdTe kontak dirençleri sırası ile $5,67 \times 10^6 \text{ Ohm.cm}^2$ ve $9,16 \times 10^6 \text{ Ohm.cm}^2$ olarak ölçüldü.

2.11 CdTe Filmlerin Spektral Fotoiletkenliğinin Belirlenmesi

Temiz ve katkılı CdTe ince filmlerin foto iletkenliğinin foton dalga boyuna bağlı değişimini incelemek için Şekil 2.16'daki düzenek kuruldu.



Şekil 2.16 CdTe ince filmlerde fotoiletkenlik ölçümünde kullanılan düzenek.

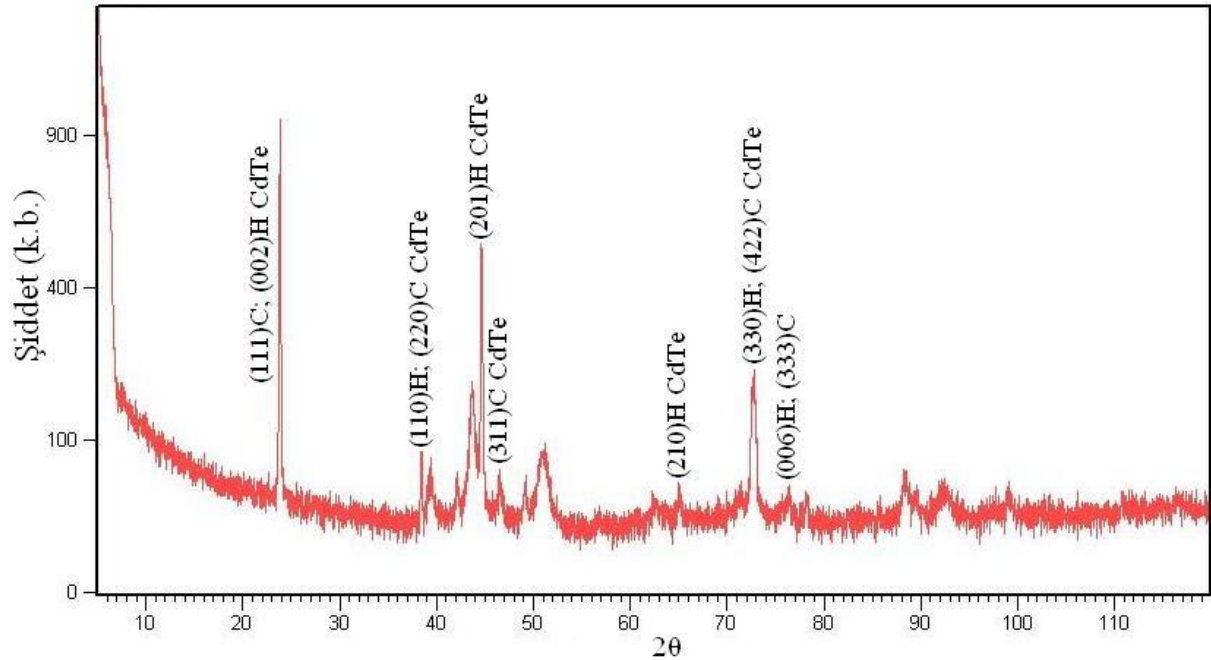
Burada monokromatörden demet halinde gelen fotonlar temiz ve katkılı CdTe film örneği üzerine düşürülerek örnekten geçen akım ölçüldü. Ölçülen tüm akım değerlerinden arka plan foto iletkenlik akımı çıkarılarak arka plan gürültü düzeltilmesi yapıldı.

3. BULGULAR

3.1 CdTe Filmlerin Özellikleri

3.1.1 CdTe Filmlerin Yapısal Özellikleri

Yakın mesafeli süblimleşme yöntemi ile cam üzerine 4µm kalınlıklarda üretilen CdTe ince filmin XRD kırınım deseni Şekil 3.1’de verilmiştir. XRD deseninde polikristal yapıda olan CdTe tanecikleri için hem hekzagonal hemde kübik yapıya ait pikler bulunmaktadır. Katkısız CdTe yapıya ait önemli pikler Çizelge 3.1 de gösterilmiştir



Şekil 3.1 CSS ile elde edilmiş 500°C de 10dak. tavllanmış CdTe filmin X-ışını kırınım deseni.

Hem kübik hem hekzagonal yapı için pikler ayrı ayrı incelenecek olursa katkı yapılmamış CdTe filmde kübik yapı için düzlemler arası mesafe (111) piki için $d=3,74213 \text{ Å}$ dir buradan (2.9) denklemi yardımı ile örgü parametresi $a=6,4815 \text{ Å}$ olarak bulunur. Kübik CdTe yapıda (111) piki $2\theta=23,778^\circ$ de olup $\text{FWHM} = 0,1181$ buradan (2.11) bağıntısı ile bulunan tanecik boyutu ortalama 0,08µm olmaktadır.

Çizelge 3.1 Temiz CdTe yapısının XRD desenine ait piklerin parametreleri.

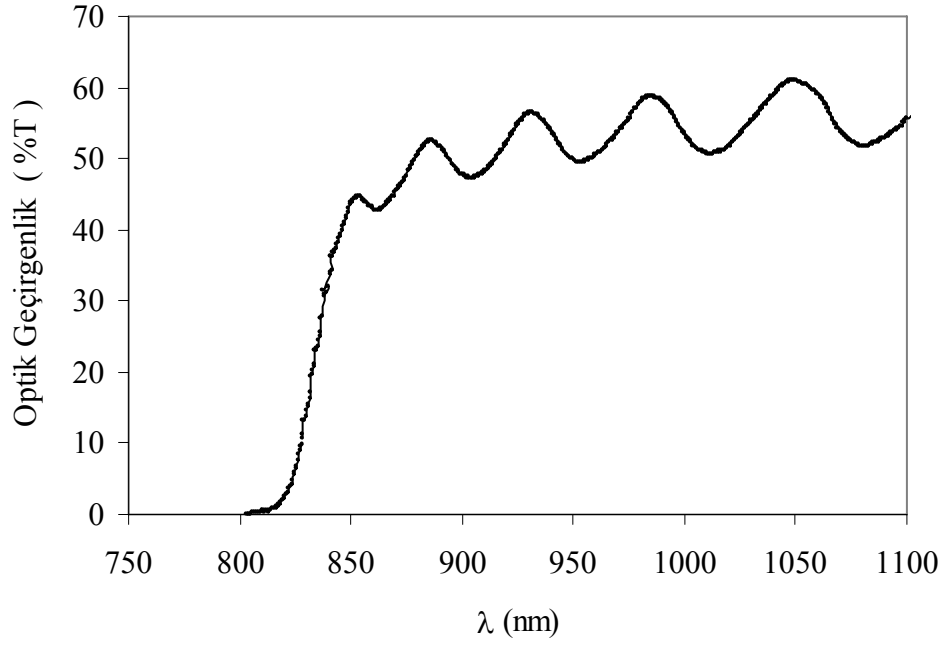
No.	d-spacing [Å]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Area [cts*°2Th.]	Tip width [°2Th.]	Pos. [°2Th.]	Pik Düzlemi
1	17.3191	1213.89	0.2362	69.46	282.79	0.24	5.1026	
2	14.1435	547.92	0.3936	31.35	212.74	0.4	6.2493	
3	3.74213	1747.57	0.1181	100	203.56	0.12	23.778	(111)küb. (002) Hek. CdTe
4	2.34455	60.6	0.1574	3.47	9.41	0.16	38.395	(220) küb., (110) Hek. CdTe
5	2.14313	32.82	0.2362	1.88	7.65	0.24	42.167	
6	2.0713	178.68	0.3936	10.22	69.37	0.4	43.703	
7	2.0302	540.12	0.1181	30.91	62.91	0.12	44.635	(201) Hek. CdTe
8	1.85129	23.85	0.4723	1.36	11.11	0.48	49.219	
9	1.79145	73.78	0.551	4.22	40.1	0.56	50.979	
10	1.4334	17.58	0.3149	1.01	5.46	0.32	65.073	(210) küb. CdTe
11	1.30181	183.01	0.1968	10.47	35.53	0.2	72.627	(330) Hek. (422) Küb. CdTe
12	1.24899	18.63	0.4723	1.07	8.68	0.48	76.231	
13	1.22223	14.74	0.4723	0.84	6.87	0.48	78.213	
14	1.10654	38.29	0.4723	2.19	17.84	0.48	88.328	
15	1.01261	15.99	0.768	0.91	16.37	0.64	99.054	

Hekzagonal yapı için incelendiğinde, tablodan (002) ve (110) pikleri için düzlemler arası mesafe sırası ile $d_{(002)} = 3.74213$ ve $d_{(110)} = 2.34455$ Å kullanılarak, (2.10) bağıntısı yardımı ile bulunan örgü parametreleri $a = 4,6891$ Å, $c = 7,484$ Å büyüklüklerinde olup c/a oranı 1,596 olmaktadır.

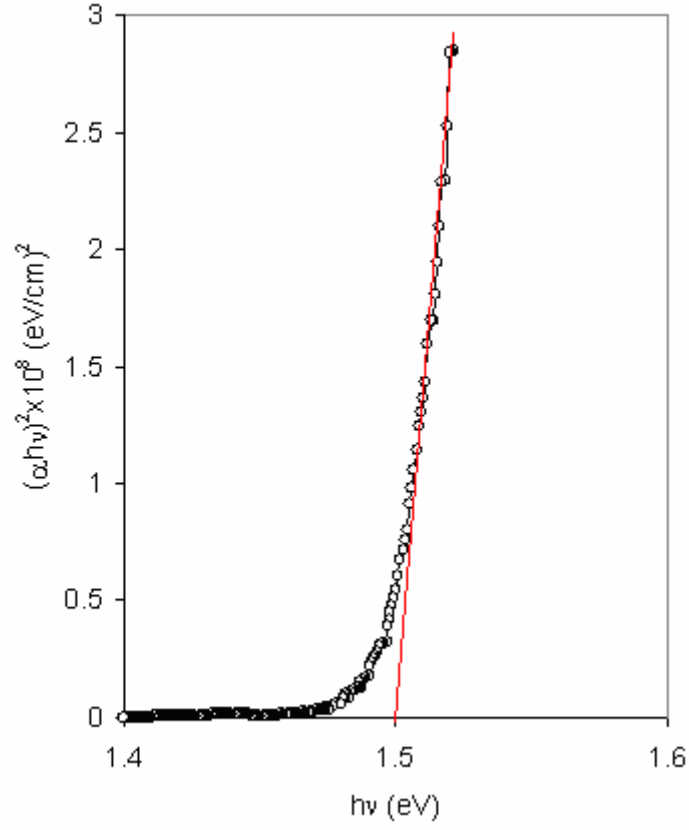
3.1.2 Optik Özellikleri

Yakın mesafeli süblimleşme ile cam üzerine 4µm kaplanarak hazırlanan katkısız CdTe ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumu $\lambda=300-1100$ nm arasında ölçüldü (Şekil 3.2).

Optik geçirgenlik ölçümünden hesaplanan absorpsiyonun foton enerjisine bağlı çizilen grafiği Şekil 3.3’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere enerji eksenine çizilen extrapole çizgi CdTe filmin oda sıcaklığındaki yasak enerji aralığı 1.5 eV değerini vermektedir.



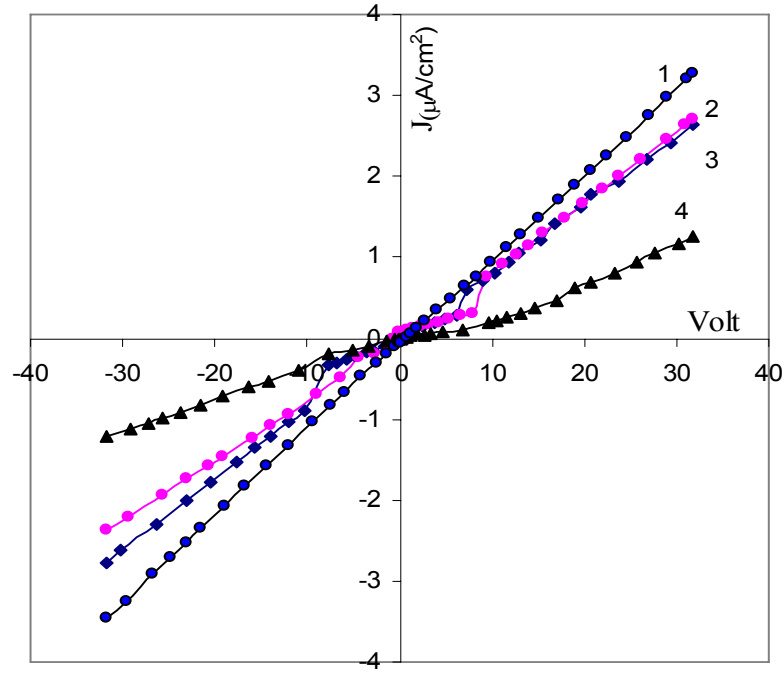
Şekil 3.2 Temiz CdTe örneğin optik geçirgenlik spektrumu



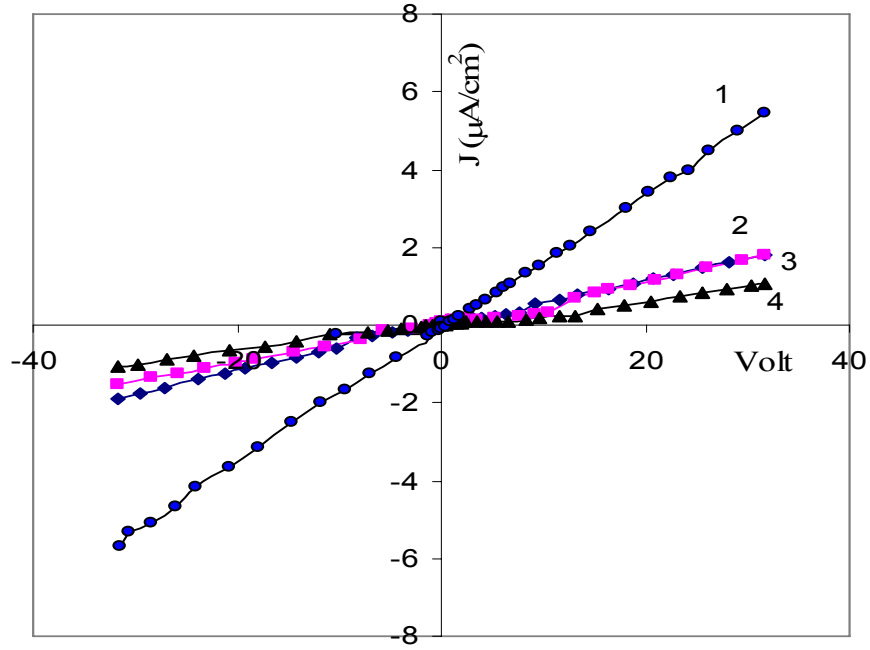
Şekil 3.3 Temiz CdTe örneğin absorpsiyon spektrumu.

3.1.3 Elektrik Özellikleri

CdTe ince filmlerin elektriksel özelliklerini incelemek amacı ile omik kontak metali seçimi yapıldı bunun için p ve n tip CdTe filmlere Cu, Ag, Al ve GaIn metalleri ile omik kontak yapıldı. Kontak metallerinin ışık altında akım gerilim (J-V) grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir. Metal-CdTe yapıların karanlıkta J-V karakteristikleri, yüksek direnç nedeniyle (10^{11} ohm.cm) gürültü nedeni ile ölçülemedi.



Şekil 3.4 p-tip CdTe ye (1) GaIn , (2) Cu, (3) Ag ve (4) Al, metalleri ile yapılan kontakların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.



Şekil 3.5 n-tip CdTe ye (1) GaIn , (2) Cu, (3) Ag ve (4) Al, metalleri ile yapılan kontakların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.

Cu, Ag, Al ve GaIn metallerinin n-CdTe ve p-CdTe deki kontak dirençleri çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Cu, Ag, Al ve GaIn metallerinin p ve n tip CdTe kontak dirençleri.

CdTe	Metallerin Kontak Dirençleri 10^6 (ohm.cm ²)			
	Cu	Ag	Al	GaIn
p-CdTe	11.57	13.18	26.02	9.16
n-CdTe	16.95	20.81	33.35	5.67

Her iki grafikte görüldüğü üzere p ve n tip CdTe ince film yarıiletkenine GaIn sıvı metali diğerlerine göre daha düşük direçli omik kontak özellik göstermektedir. Cu ve Ag metallerinin kontak direnci GaIn metaline göre daha fazladır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda elektriksel ölçümler için eutektik yöntemle elde edilen GaIn metali kullanıldı.

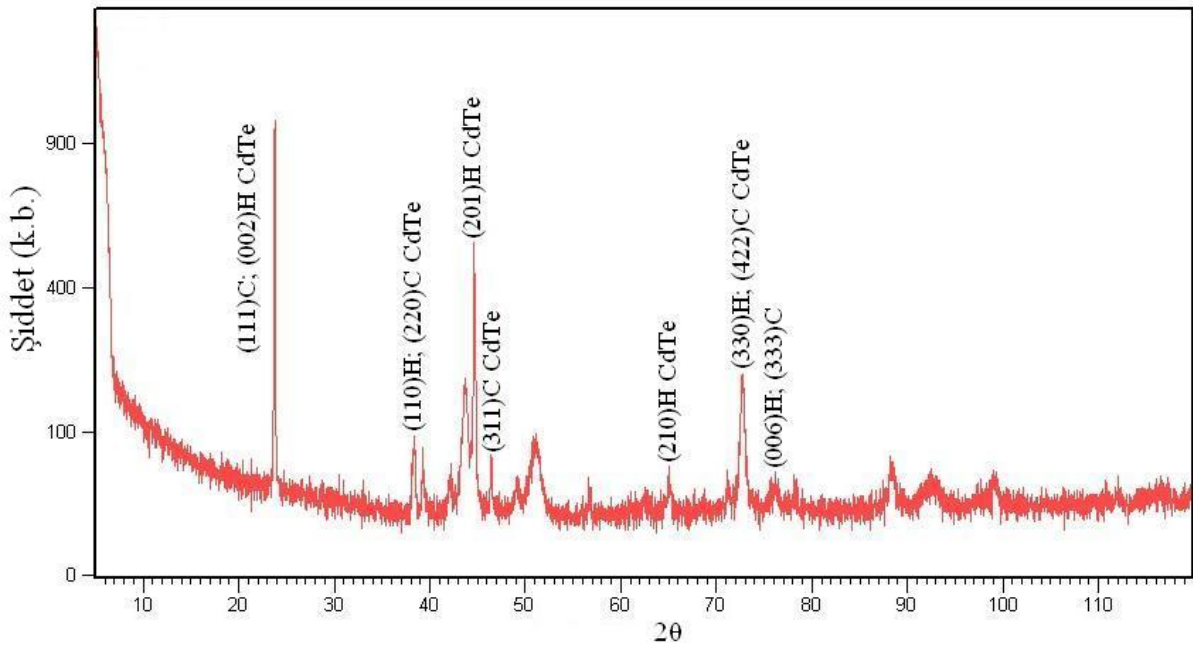
CSS yöntemi ile elde edilen CdTe ince filmler p-tipi olarak elde edilmektedir. Daha sonra katkı ile n tipine çevrilmiştir.

Van der Pauw iletkenlik ölçümlerinden p-CdTe filmlerin öz direnci 1×10^5 ile 2×10^7 ohm.cm aralığında değişen değerlerde ölçüldü. Oldukça yüksek olan bu öz direnç difüzyon ile gerçekleştirilen katkı ile düşürüldü. P tip katkı için CdCl_2 bileşiği, n tip katkı için In metali kullanıldı. CdCl_2 kakısında öz direnç 10^1 kat n-tipi katkıda ise 10^6 kat öz direnç düşmüştür.

3.2 Au Difüzyonunun CdTe Filmin Özelliklerine Etkisi

3.2.1 Au ile Katkılanmış CdTe Filmlerin XRD Karakteristikleri

Altın difüzyonunun CdTe filmlerin yapsal özelliklerine etkisini incelemek amacı ile $4 \mu\text{m}$ CdTe üzerine 50nm Altın elektron demeti yöntemi ile buharlaştırıldı ve 10^{-2} torr vakumda 500°C sıcaklıkta 10 dakika tavlandı. Film üzerinde artık kalan Au metali kimyasal yöntemle (HNO_3) temizlendi. Temizlik işleminden sonra yapılan X-ışını difraksiyon ölçümü deseni Şekil 3.6’da verilmiştir.



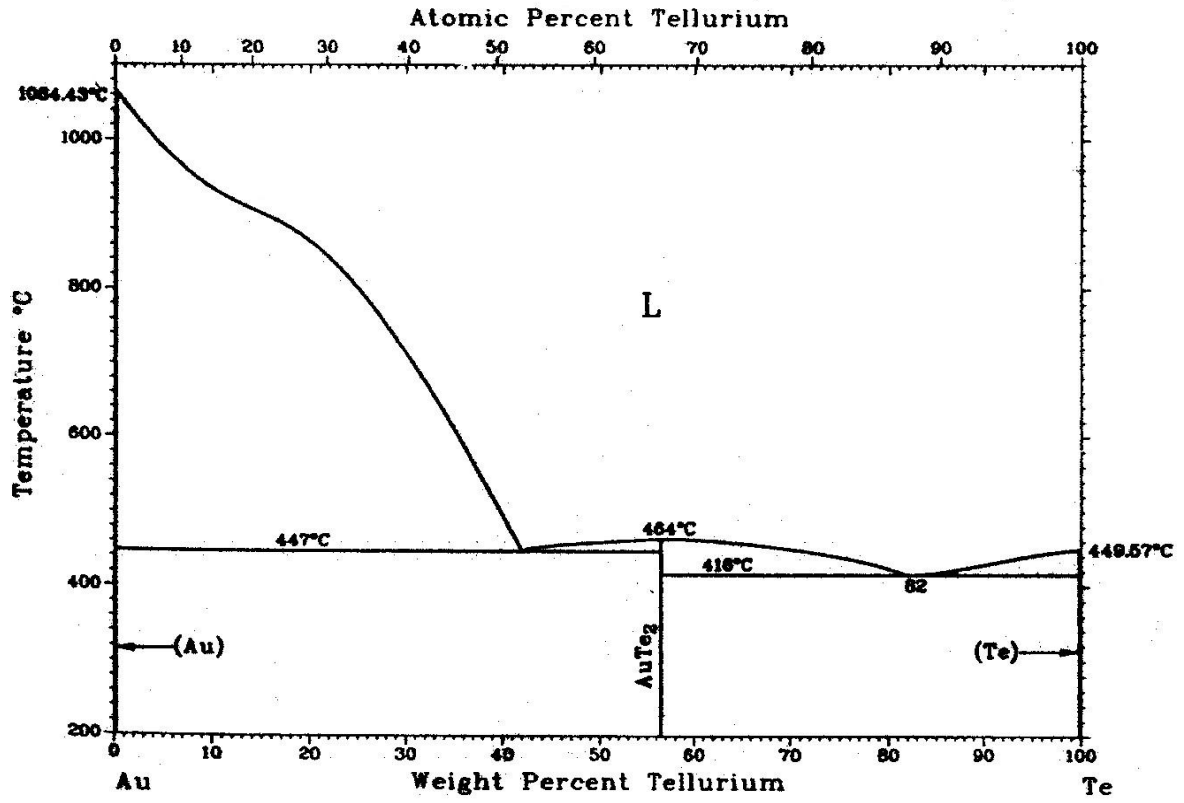
Şekil 3.6 500°C 'de 10dak. tavllanmış Au/CdTe yapının XRD deseni.

XRD deseninde hem kübik hemde hekzagonal yapıya ait pikler görülmektedir. Kübik yapıya ait (şiddetli) karakteristik (111) CdTe piki görülmektedir. Au/CdTe yapıya ait önemli pikler Çizelge 3.3 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Au/CdTe yapının XRD desenine ait piklerin parametreleri.

No.	d-spacing [Å]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Area [cts*°2Th.]	Tip width [°2Th.]	Pos. [°2Th.]	Pik Düzlemi
1	14.27757	594.53	0.551	63.15	323.17	0.56	6.1905	
2	3.74497	941.51	0.0984	100	91.39	0.1	23.7596	(111) Küb. CdTe
3	2.34369	67.43	0.1574	7.16	10.47	0.16	38.4091	(110) Hex. CdTe
4	2.29485	51.13	0.1968	5.43	9.93	0.2	39.2597	(220) Küb. CdTe
5	2.14419	28.66	0.3149	3.04	8.9	0.32	42.1448	
6	2.07125	158.31	0.3149	16.81	49.17	0.32	43.7039	
7	2.02858	521.75	0.12	55.42	83.48	0.1	44.633	(201) Hex. CdTe
8	2.0279	358.62	0.096	38.09	45.9	0.08	44.7657	
9	1.95408	42.02	0.24	4.46	13.45	0.2	46.4322	
10	1.85226	20.33	0.576	2.16	15.61	0.48	49.1481	
11	1.78699	64.16	0.672	6.81	57.49	0.56	51.0697	
12	1.62157	15.64	0.288	1.66	6	0.24	56.7232	
13	1.43209	21.13	0.384	2.24	10.82	0.32	65.0797	
14	1.29917	157.54	0.48	16.73	100.83	0.4	72.7286	(300) Hex. (422) küb CdTe
15	1.24693	13.73	0.768	1.46	14.06	0.64	76.3052	
16	1.22132	15.7	0.576	1.67	12.06	0.48	78.2052	
17	1.10506	29.59	0.768	3.14	30.3	0.64	88.3839	
18	1.01158	15.03	0.576	1.6	11.54	0.48	99.1894	

Kübik CdTe (111) pike ait yarı yüksekliğin tam genişliği (FWHM) 0.0984 değerindedir. (2.11) bağıntısına göre hesaplanan CdTe polikristal (ortalama) tanecik boyutu 0,09(1) μ m civarındadır. Düzlemler arası mesafe $d_{(111)} = 3,7449 \text{ Å}$ olup örgü parametresi $a = 6,48 \text{ Å}$ olarak hesaplandı. Hekzagonal yapı için incelendiğinde, tablodan (002) ve (110) pikleri için düzlemler arası mesafe sırası ile $d_{(002)} = 3.74497$ ve $d_{(110)} = 2.34369 \text{ Å}$ kullanılarak, (2.10) bağıntısı yardımı ile bulunan örgü parametreleri $a = 4,687 \text{ Å}$, $c = 7,489 \text{ Å}$ büyüklüklerinde olup c/a oranı 1,597 olmaktadır.

Au-Te

Şekil 3.7 Au-Te elementlerine ait faz diyagramı. (Baker, 1999)

3.2.2 Au'nun CdTe Filmlerinde Difüzyonu

Au'nun, CdTe de difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimini belirleyebilmek için Çizelge 3.4 de gösterilen şartlarda Au/CdTe örnekler hazırlandı.

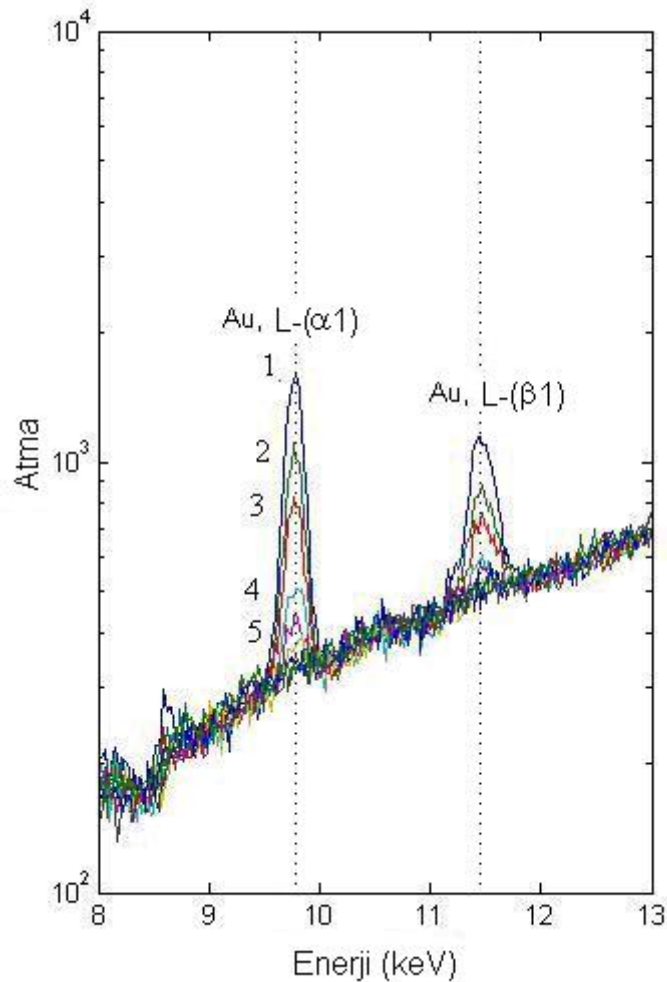
Çizelge 3.4 Hazırlanan Au/CdTe örneklerin kalınlıkları ve tavlama sıcaklıkları

Sıcaklık	Au kalınlığı	CdTe kalınlığı	Kaplanan Au Alanı (cm ²)
350°C	11nm	6,8µm	0,40
450°C	11nm	6,8µm	0,42
500°C	11nm	6,8µm	0,40
550°C	11nm	6,8µm	0,38

Yaklaşık $7\mu\text{m}$ CdTe üzerine 11nm kalınlıkta Au elektron demeti yöntemi ile kaplandı. Her numune tabloda verilen sıcaklıkta vakum ortamında (10^{-3} torr) 5 dakika süre ile tavlandı. Tavlama sonrası CdTe üzerinde kalan Au atomları mekanik ve kimyasal temizleme ile yüzeyden uzaklaştırıldı.

Hazırlanan örnek içindeki Au konsantrasyonu kalınlıkla değişimini ölçebilmek için çapı $2\text{--}3\mu\text{m}$ olan elmas pasta ile yüzeyden yaklaşık $0,8\mu\text{m}$ kalınlıklarda CdTe tabakası ayrılarak XRF(yöntemi) ile Au metaline ait Au-K(α) piki şiddeti ölçüldü.

500°C de 5 dakika tavllanmış Au/CdTe numune için Au (şiddet) piki şiddetinin kalınlıkla değişimi Şekil 3.8 ve Çizelge 3.5’de verilmiştir. Çizelgede 3.5’de verilen XRF pik şiddetleri gürültü çıkarılarak verilmiştir.

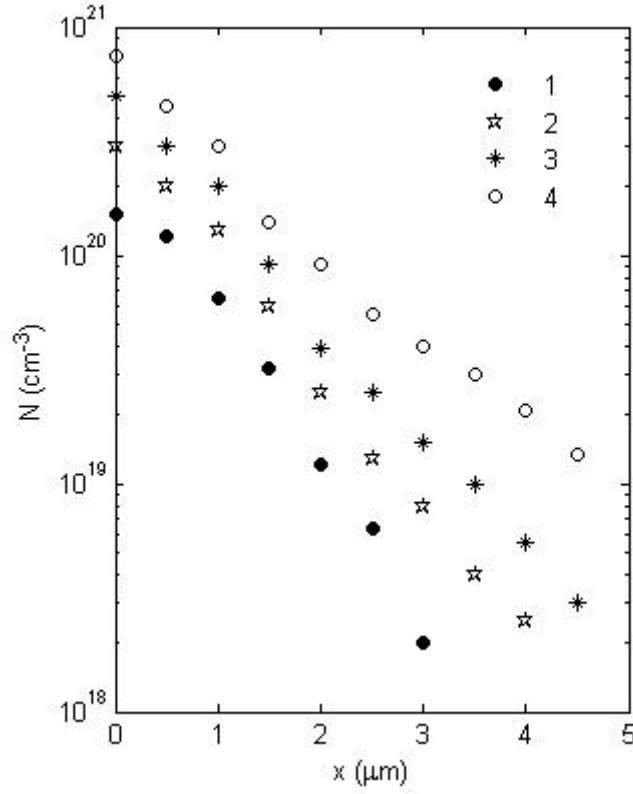


Şekil 3.8 500°C de 5 dakika süre ile Au difüzyon yapılmış CdTe yapıda Au metaline ait XRF pikinin kalınlıkla değişimi (parlatma sırası 1, 2, 3, 4 ve 5 şeklindedir)(Au, L-(α 1) ($9,713\text{keV}$), Au, L-(β 1) ($11,440\text{keV}$)).

Çizelge 3.5 Au L-Alfa pikini örnek kalınlığı ile değişimi.

	XRF piki	Enerji
500°C	Au L(α 1)	9,713 keV
Parlatma işlem sırası	Örnek kalınlığı (μ m)	Au Pik şiddeti
1	0.86	1238
2	1.4	1260
3	1.62	1238
4	1.96	1208
5	2.19	1045
6	2.37	1031
7	2.95	682
8	3.5	425
9	3.58	387
10	3.86	310
11	4.14	196
12	4.40	107
13	4.61	40
14	4.99	21

400, 450, 500, 550 °C sıcaklıklarında Au difüzyonu yapılmış CdTe filmlerinde aynı ölçümler yapıldı. Bu ölçümlerden pik şiddetine bağlı Au konsantrasyon hesabı yapıldı ve bu sıcaklıklara ait Au konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 (1) 400, (2) 450, (3) 500, (4) 550 °C sıcaklıklarında tavlama ile Au metalinin CdTe filme difüzyonu sonrası Au konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi.

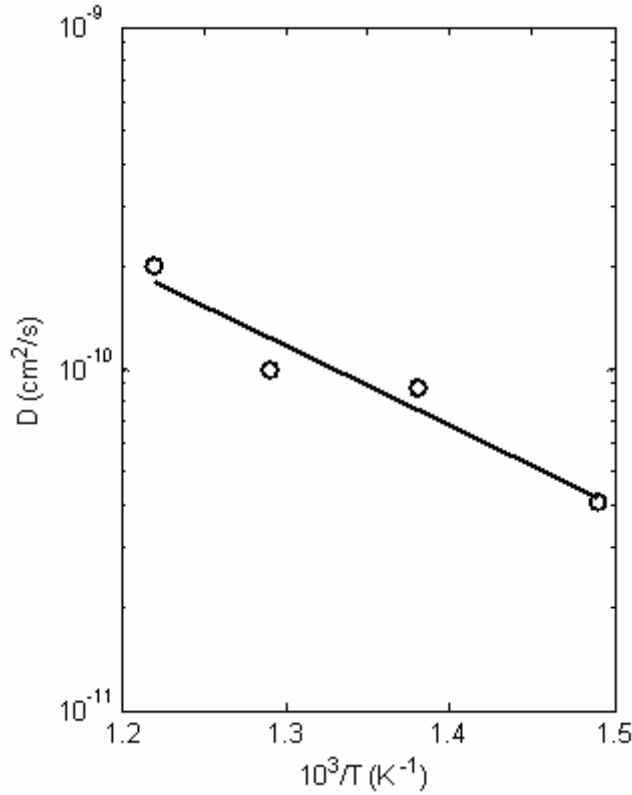
Şekil 3.9’da görüldüğü üzere aynı sürede sıcaklık arttıkça difüzyon derinliği artmakta ve aynı kalınlığına denk gelen (Au) konsantrasyonu büyümektedir.

Bu grafikten faydalanarak her bir sıcaklık için sabit kaynaktan yapılan difüzyona ait difüzyon katsayıları (1.11) bağıntısı kullanarak hesaplanmıştır ve Çizelge 3.6 verilmiştir.

Çizelge 3.6 Au’nun CdTe de farklı sıcaklıklarda difüzyon katsayıları

T°C	$10^3/T(K)$	D(cm ² /s)
400	1.486	4.1×10^{-11}
450	1.383	8.8×10^{-11}
500	1.294	1.0×10^{-10}
550	1.215	2.0×10^{-10}

Yarı logaritmik eksenle çizilen difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi [$D(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^3/T(\text{K})$] Şekil 3.10'daki gibidir.



Şekil 3.10 Au'nun CdTe filmde difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.

Altının 400-550°C arasında etkin difüzyon katsayısı sıcaklık arttıkça 4.1×10^{-11} den 2.0×10^{-10} cm^2/s değerine artmaktadır. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişiminin Arrhenius bağıntısı ile ifadesi,

$$D(T) = 4.4 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0.54 \text{ eV}}{kT}\right) \quad (3.1)$$

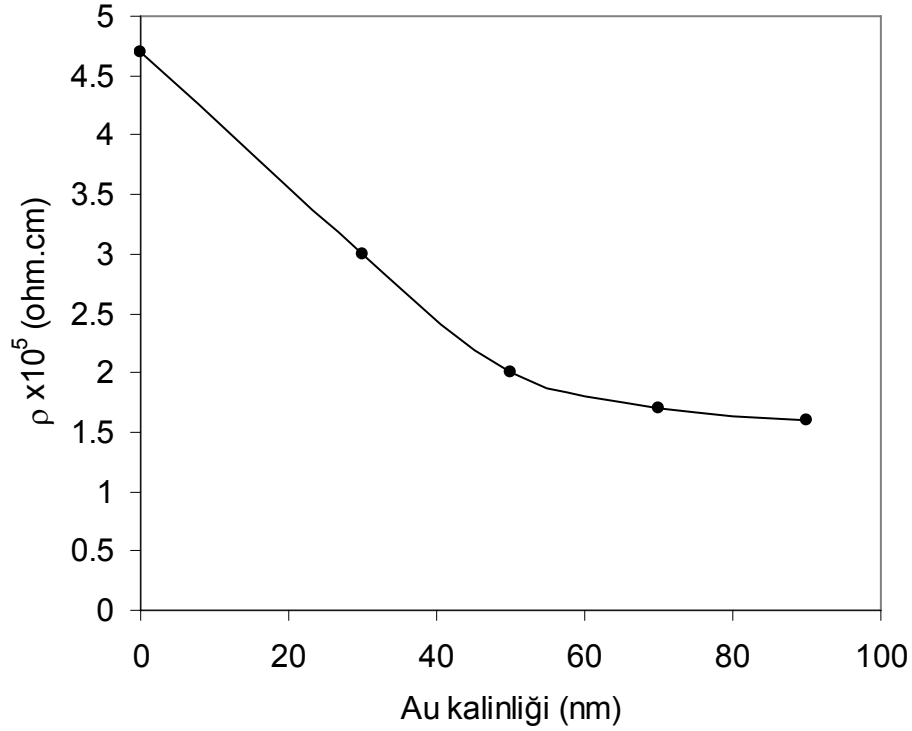
Şeklinde olup bu ifadeye göre difüzyon aktivasyon enerjisi 0,54eV değerindedir, difüzyon çarpanı $4.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ değerindedir. CdTe polikristal filmlerinde altının düşük aktivasyon enerjisine sahip olmasının nedeni, onun tane yüzeylerinden hızla ve tanelerin içine doğru daha yavaş hızla girmesi şeklinde yorumlandı

3.2.3 Au Katkılı CdTe Filmlerin Elektriksel Karakteristikleri

Au katkısının CdTe filmlerin elektriksel karakteristiklerine etkisini incelemek amacı ile 30, 50, 70 ve 90 nm kalınlıklarında Au metali CSS ile elde edilen CdTe film örneği üzerine kaplandı. Her numune 400°C de 1 saat tavlansarak CdTe filmine Au katkısı yapıldı. Tavlama sonrası

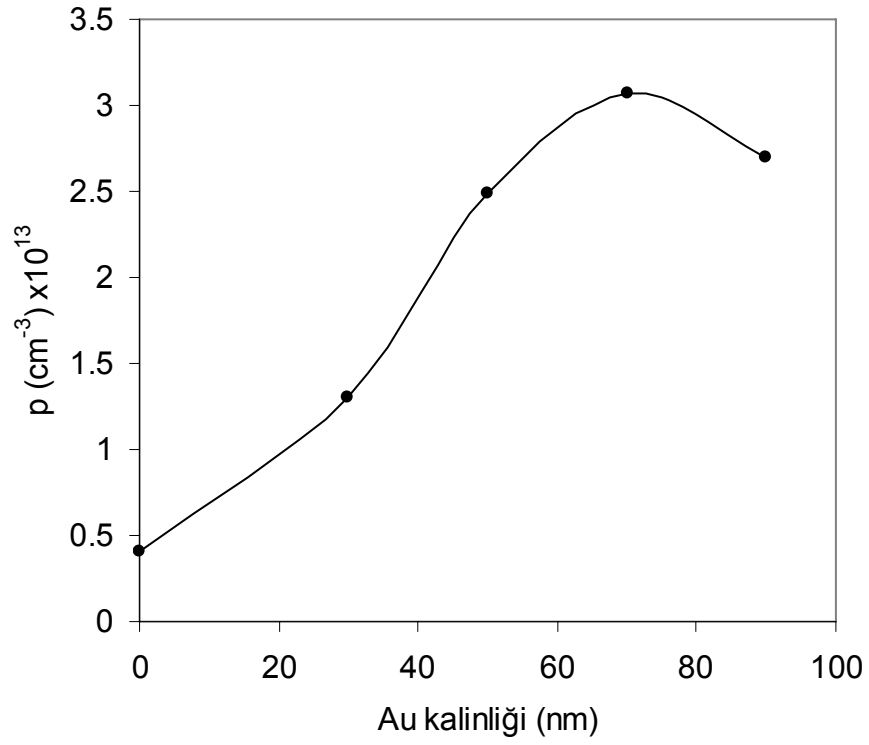
CdTe üzerinde kalan Au metali (HNO_3 , 3HCl) asit karışımı ile temizlendi. Elde edilen her numune ve katkısız CdTe için Van der Pauw yöntemi ile öz direnç Hall ölçümü ile konsantrasyon ve mobilite ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçları Çizelge 3.7 de verilmiştir.

Kaplanan Au kalınlığının CdTe nin öz direncine etkisi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Au filmin kalınlığının CdTe öz direncine etkisi.

Katkı olarak kullanılan Au metalinin kalınlığı arttıkça CdTe filmin öz direnci azalma göstermektedir. Bununla birlikte kaplanan Au kalınlığı arttıkça buna bağlı olarak Au katkı atomları sayısı artmakta ve CdTe filmde yük taşıyıcı konsantrasyonu da artmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Au filmin kalınlığının CdTe yük taşıyıcı konsantrasyonuna etkisi.

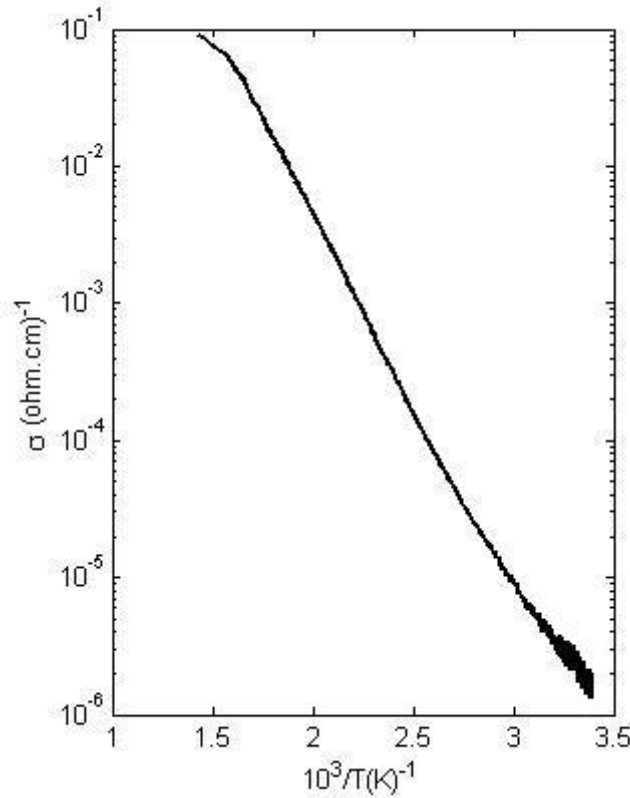
CdTe filmin iletkenlik tipi Au katkısı öncesi p-tipi olup Au katkısı sonrası da p-tipi olarak kalmıştır. Au katkısı, CdTe de yük taşıyıcıların mobilitelerini azaltmaktadır.

Çizelge 3.7 Au kalınlığının CdTe filmin elektriksel özelliklerine etkisi

Au	Temiz CdTe	30nm	50nm	70nm	90nm
Özdirenç (ohm.cm)x10 ⁵	4.7	3	2	1.7	1.6
iletkenlik (ohm.cm) ⁻¹ x10 ⁻⁶	2.1	3.3	4.88	5.74	6.1
p (cm ⁻³) x10 ¹³	0.41	1.3	2.49	3.07	2.7
mobilité (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	141.84	87.23	79.21	70.16	80.82

3.2.4 Katkısız ve Au katkılı CdTe Filmlerin İletkenlik-Sıcaklık Eğrisi

Katkısız CdTe filmin yasak bant aralığında bulunan enerji seviyelerini belirlemek amacı ile iletkenlik sıcaklık ölçümü yapıldı. Bu ölçüm için yakın mesafeli süblimleşme ile cam altlık üzerine kaplanarak, üretilen 3µm kalınlıktaki katkısız CdTe numunesi 1mikron kalınlıktaki elmas parlatıcı ile mekanik olarak parlatıldı. Dikdörtgen şeklindeki CdTe(Au) örneğe GaIn kontaklar yapılarak 4 kontak yöntemi ile iletkenliği ölçülerek (T_{oda} ile 400°C sıcaklık aralığında) iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi ölçümü yapıldı ve yarı logaritmik eksenle grafiği çizildi (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Katkısız CdTe ince film yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi($\sigma \cdot 10^3/T$).

Şekil 3.13’de görüldüğü üzere grafiğin sadece bir eğimi vardır ve bu eğimden hesaplanan enerji 1.47 eV olup CdTe nin yasak enerji değerini vermektedir.

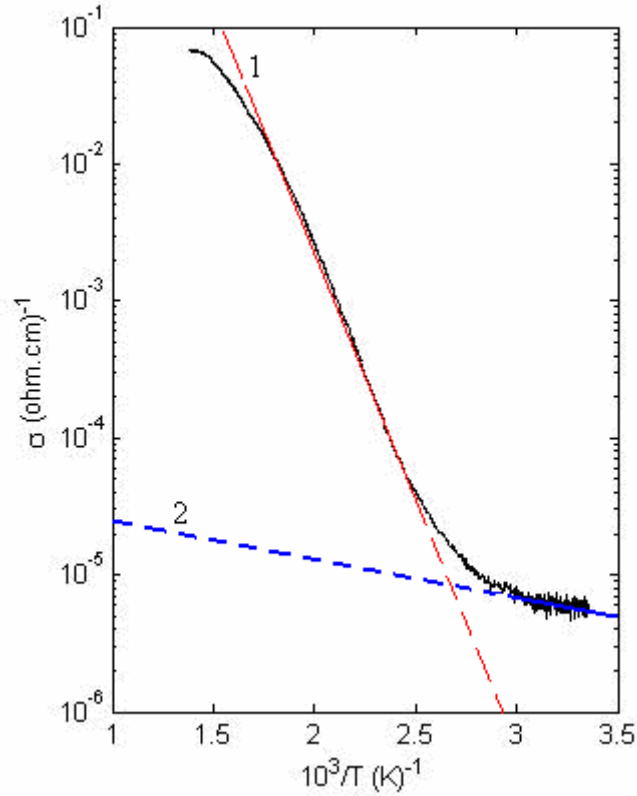
Tavlama yöntemi ile difüzyonla katkılanan CdTe ince filmlerde Au katkısının CdTe filmin yasak enerji aralığındaki yerini belirlemek için iletkenlik- sıcaklık ölçümü yapıldı.

Bu ölçüm için yakın mesafeli süblimleşme ile üretilen 3µm CdTe üzerine 50nm kalınlıkta Au metali kaplandı ve 400°C de 1 saat tavlandı. İnce film üzerinde kalan Au metali (1HNO₃,

3HCl) asit karışımı ile temizlendi ve mekanik olarak parlatma yapıldı. Yapılan tip ölçümü Au katkılı CdTe örneklerin p tip olduğunu göstermiştir.

Ölçüm sıcaklık aralığı oda sıcaklığından 450°C ye kadardır. Faz geçişi ve yapısal kusurların artabilmesi nedeni ile daha yüksek sıcaklığa çıkılmadı.

Yapılan ölçümde iletkenliğin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Au katkılı CdTe ince film yarıiletkenin ($\sigma \cdot 10^3/T$) eğrisi. (1) eğrinin eğimi yasak enerji aralığını, 2 numaralı eğrinin eğimi katkı seviyesini göstermektedir.

Sekil de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça iletkenlik artmaktadır. Şekil 3.14’deki ($\sigma \cdot 10^3/T(K)$) grafik Şekil 3.13’deki grafik ile kıyaslanırsa iki eğim görülmektedir. 1 numaralı eğimden (2.16) formülü kullanılarak elde edilen enerji 1.5eV olarak bulunmuştur. Bu değer CdTe filmin yasak enerji aralığını vermektedir. İkinci eğim ise (2.15) numaralı formülden 0,2 eV olarak bulunmuştur. Bu değer Altını CdTe filmde katkı gibi davranması ile oluşan enerji seviyesinin yeri olup valans bandından 0,2eV yukarıdadır. Böylece, altınla katkılanmış CdTe filminde $E_a = E_v + 0.2$ eV akseptör seviyesi meydana gelmektedir.

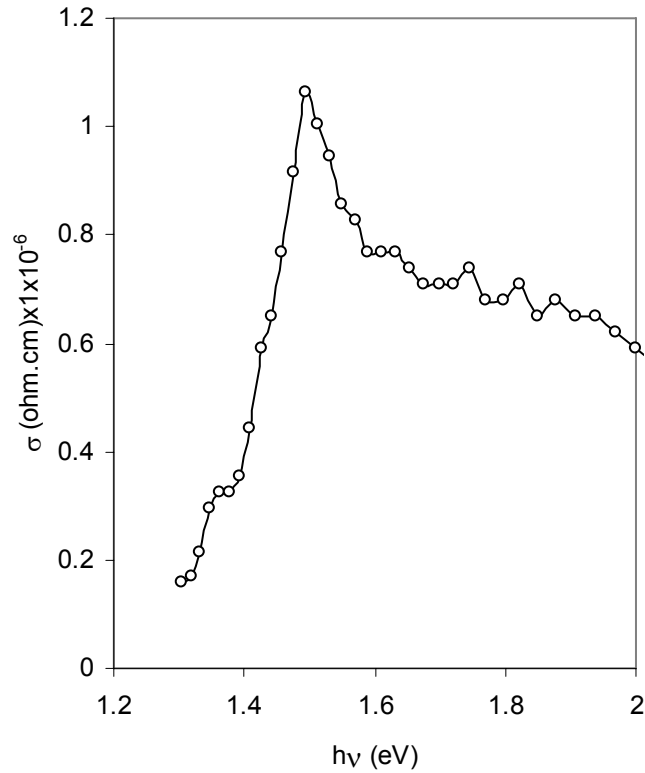
İletkenlik sıcaklık ölçüm sonrası da örnekler p-tipi iletkenlik özelliğine sahiptir.

Altının CdTe de katkı seviyesinin yerini belirlemek amacı ile iletkenlik sıcaklık ölçümleri yanı sıra destekleyici ölçümler olarak optik ölçümler yapılmıştır. Bunlar foto-iletkenlik ve absorpsiyon ölçümleridir.

3.2.5 Au ile Katkılanmış CdTe Filmlerin Foto İletkenlik ve Optik Absorpsiyon Spektrumları

Yakın mesafeli süblimleşme ile üretilen 3 μ m CdTe üzerine 50nm kalınlıkta Au metali kaplandı ve 450°C de 1 saat tavlandı. Difüzyon yöntemiyle katkılanan CdTe ince film örneği iletkenlik tipi p idi.

Au ile katkılanan örnek de Altının CdTe' de katkı seviyesini belirleyebilmek için foto iletkenlik spektrumu ölçüldü (Şekil 3.15).

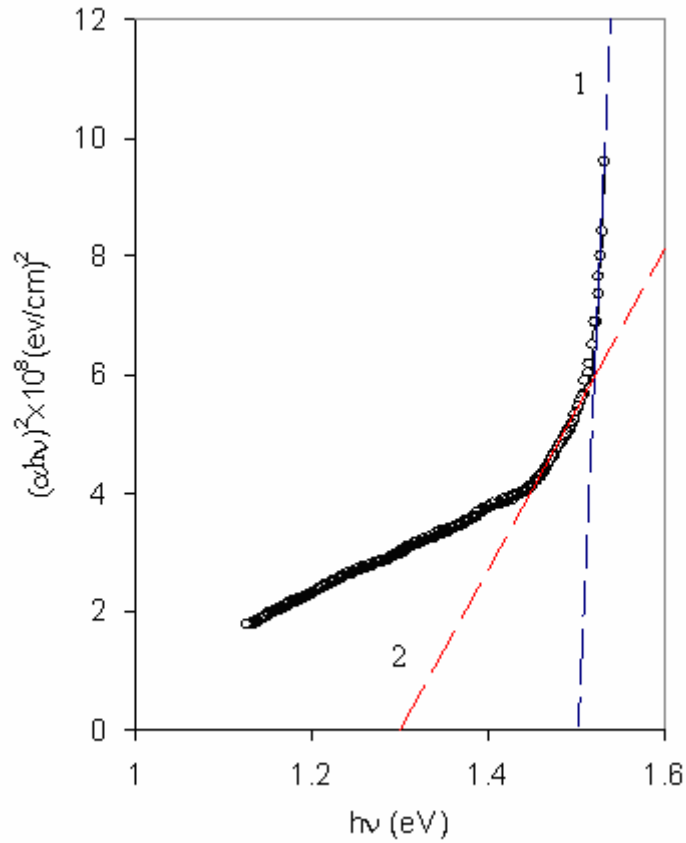


Şekil 3.15 450°C'de 1 saat tavlansın Au ile katkılanmış CdTe filmin foto-iletkenlik spektrumu.

Şekil 3.15'den görüldüğü üzere 1.3 eV foton enerjisinde numunenin foto-iletkenliği artmaya başlamış foton enerjisi 1.4eV ulaştığında iletkenlik daha fazla artmamıştır. Foto-iletkenliğin

bu şekilde artışı elektronların $E_a=E_v+0.15$ eV katkı seviyesinden iletkenlik bandına geçmesi ile açıklanmaktadır. Foton enerjisi 1.45eV ve yukarısında fotoiletkenlik büyük oranda artma göstermiştir. Bu durum CdTe nin yasak enerji aralığının 1.45-1.5eV olması nedeni ile valans bandından iletkenlik bandına elektron geçmesi ile mümkün olmaktadır.

Diğer taraftan aynı şartlarda hazırlanmış Au katkılı CdTe örneğin absorpsiyon spektrumu Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Bu grafikte gösterilen absorpsiyona ait iki eğimden büyük olanı CdTe ince film yarıiletkenin yasak enerji aralığını 1.5eV, ikinci eğimde katkı düzeyinin enerji seviyesinin iletkenlik bandından olan uzaklığını (1.3eV) vermektedir. Daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olan eğim (0.9 eV) tüm CdTe filmlerinde (temiz ve katkılı) görülmektedir ve bu tür optik soğurmanın nedeni örneklerdeki kusurlardan kaynaklanmaktadır. Baier vd., (2006) diğerleri tarafından polikristal CdTe film için yaptıkları PICTS ölçümünde 0,65 ve 0,85eV değerinde kusurlardan kaynaklanan iki derin seviye tespit etmişlerdir.

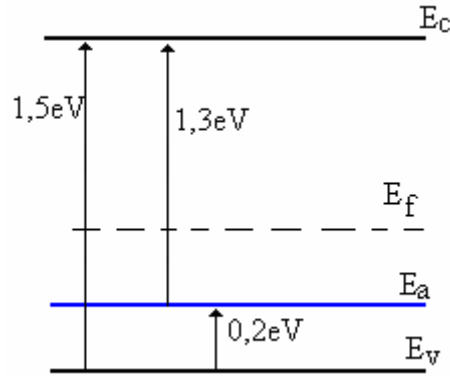


Şekil 3.16 450°C’ de 1 saat tavlanarak Au ile katkılanmış CdTe filmin foton dalgaboyuna bağlı absorpsiyon (spektrumu). (1) CdTe yasak enerji aralığını, (2) katkı seviyesini vermektedir.

Her iki ölçüm sonucunda Au katkısının CdTe'nin iletkenlik bandındaki seviyesinin değeri ve yeri iletkenlik bandından aşağıda olmak üzere 1,3eV dur. Kullanılan örneklerin iletkenlik tipi p-tip olup yasak enerji aralığı 1.5eV olduğundan Au katkı seviyesi akseptör seviyesi olarak kendini göstermekte ve valans bandından 0.2eV kadar yukarıda konumlanmaktadır ($E_a = E_v + 0.2\text{eV}$).

Yapılan iletkenlik sıcaklık, foto-iletkenlik ve absorpsiyon spektrumlarından görüldüğü gibi Au katkısı CdTe ince filmin bant diyagramında 0,2eV luk akseptör enerji seviyesine sahiptir. Bu seviye bant diyagramında Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

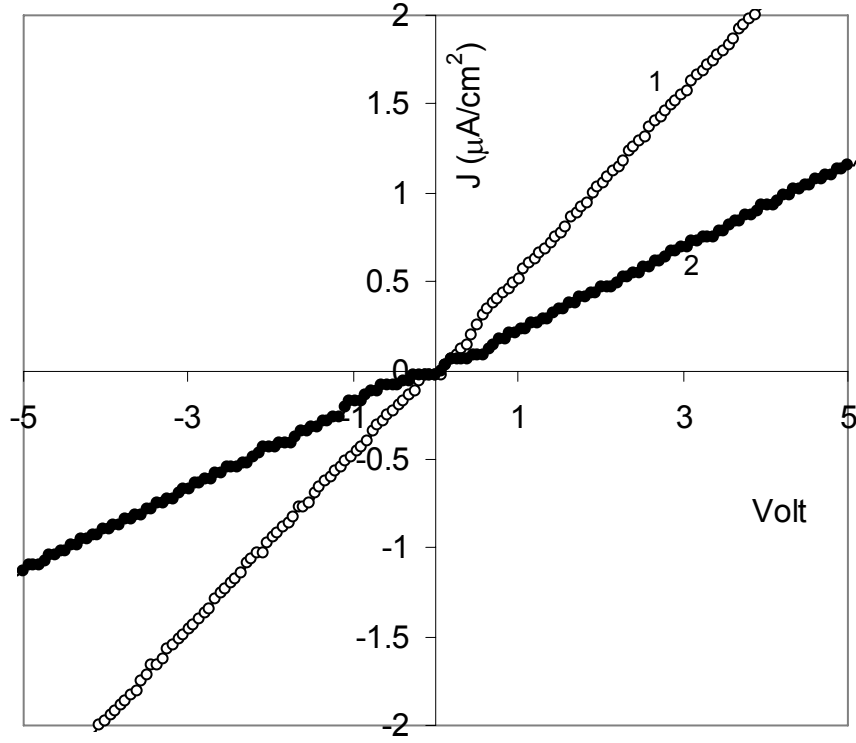
Böylece iletkenlik-sıcaklık, fotoiletkenlik ve optik absorptiyon ölçümlerinden elde edilen Au için iyonlaşma enerji 0.2 eV, 0.15eV ve 0.2 eV dır.



Şekil 3.17 Au katkısının (p)CdTe bant diyagramındaki yeri.

3.3 Au/pCdTe Yapının I-V Karakteristikleri

4µm kalınlıkta p tipi iletkenlikte CdTe film örneği üzerine 50nm Au metali kaplanmıştır. Omik kontak olarak kimyasal aşındırma sonrası GaIn sıvı metali kullanılmıştır. Oluşturulan Au/pCdTe eklemine ait akım gerilim grafiği Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Grafiğe göre oluşan eklem omik kontak özellik göstermektedir. Eklem kontak direnci aydınlıkta $2,01\text{M}\Omega/\text{cm}^2$ ve karanlıkta $4,31\text{M}\Omega/\text{cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 Ag/pCdTe eklem (1) Aydınlik ve (2) karanlık akım-gerilim (I-V) grafiği.

Au metalinin p tipi CdTe de omik özellik göstermesi ekleme ait band diyagramından anlaşılmaktadır. Au metalinin çıkış işi 5,4eV değerindedir. CdTe yarıiletkenin afinitesi $X_{CdTe}=4,3\text{eV}$ olup elde ettiğimiz örneklerin iletkenlikleri $10^{-5} (\text{ohm.cm})^{-1}$ civarındadır. Bu durumda p tip CdTe nin yük taşıyıcı konsantrasyonu, yaklaşık $0,41 \times 10^{13} (\text{cm}^{-3})$ ve oda sıcaklığındaki fermi seviyesi $E_f = 0,397\text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre p tip CdTe nin termodinamik çıkış işi,

$$\Phi_{CdTe} = (E_g - E_f) + X_{CdTe} = (1,5 - 0,397) + 4,3 = 5,403 \text{ eV} \quad (3.2)$$

olarak hesaplandı.

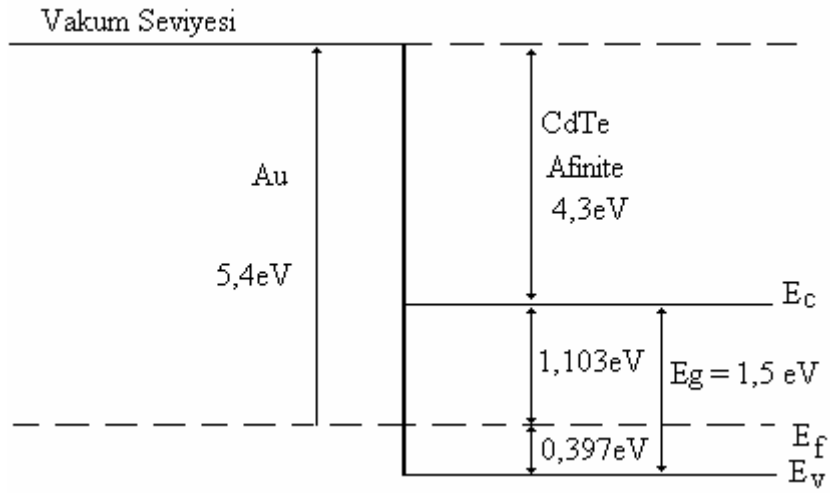
Bu durumda Au metal ile CdTe arasında oluşacak eklem bariyer yüksekliği,

$$\Phi_b = \Phi_{CdTe} - \Phi_{Au} \quad (3.3)$$

bağıntısından,

$$\Phi_b = 5,403 - 5,4 = 0,003 \text{ eV}$$

olmaktadır. Ekleme ait band diyagramı Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Oldukça küçük olan bariyer yüksekliği omik kontak eklem olarak kabul edilebilir büyüklüktedir. Deneysel olarak elde edilen akım gerilim grafiğinden de görüldüğü gibi eklem omik özellik göstermektedir.

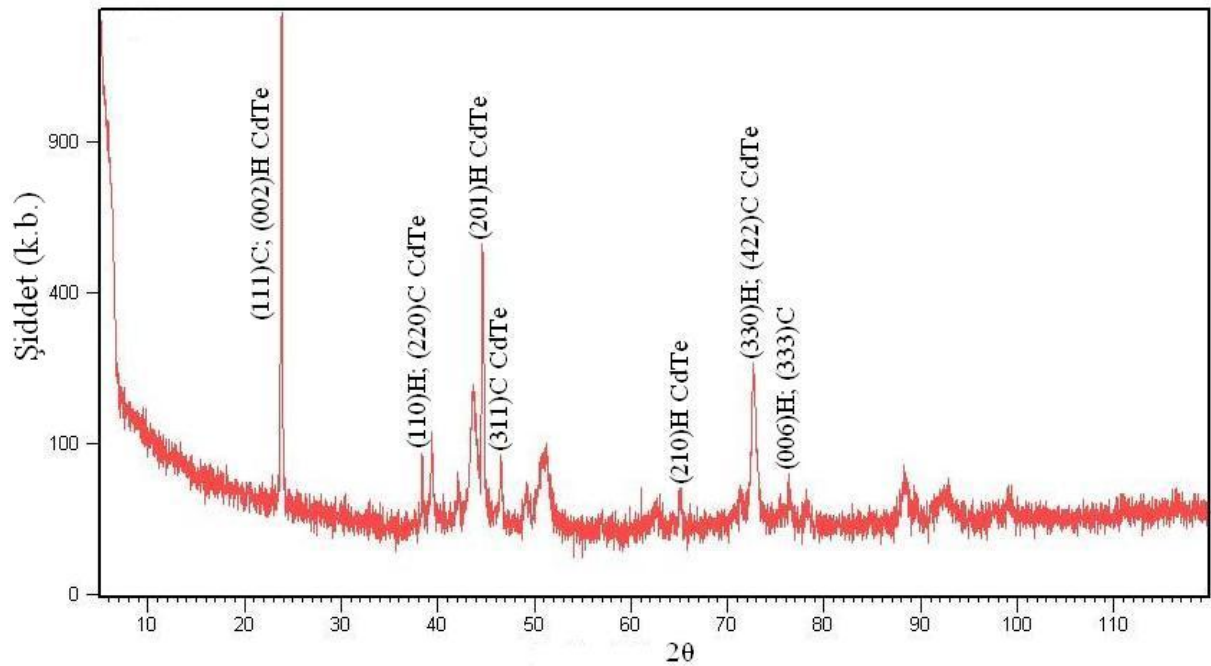


Şekil 3.19 Au/pCdTe eklem bant diyagramı.

3.4 Ag Difüzyonunun CdTe İnce Filmlerin Özelliklerine Etkisi

3.4.1 Ag ile Katkılanmış CdTe Filmlerin XRD Karakteristikleri

Ag difüzyonunun CdTe filmlerin yapısal özelliklerine etkisini incelemek amacı ile $4\mu\text{m}$ kalınlıkta CdTe ince filmi üzerine 50nm Ag metali, elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile kaplandı. Kaplama işleminden sonra numune 10^{-2} torr basınçtaki vakumda 500°C sıcaklıkta 10 dakika tavlandı. Film üzerinde kalan difüzyon etmemiş Ag metali kimyasal yöntemle temizlendi. Yapsal analiz için elde edilen XRD ölçüm deseni Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20 500°C ’de 10dak. tavllanmış Ag/CdTe yapının XRD deseni.

Elde edilen desende CdTe nin kübik yapıya ait (111), (220), (330) pikleri ve görülmektedir. Bununla birlikte CdTe nin hegzagonal yapısına ait (201),(210) pikleri de görülmektedir.

Ag/CdTe yapıya ait önemli pikler Çizelge 3.8 gösterilmiştir

Çizelge 3.8 Ag/CdTe yapının XRD desenine ait piklerin parametreleri.

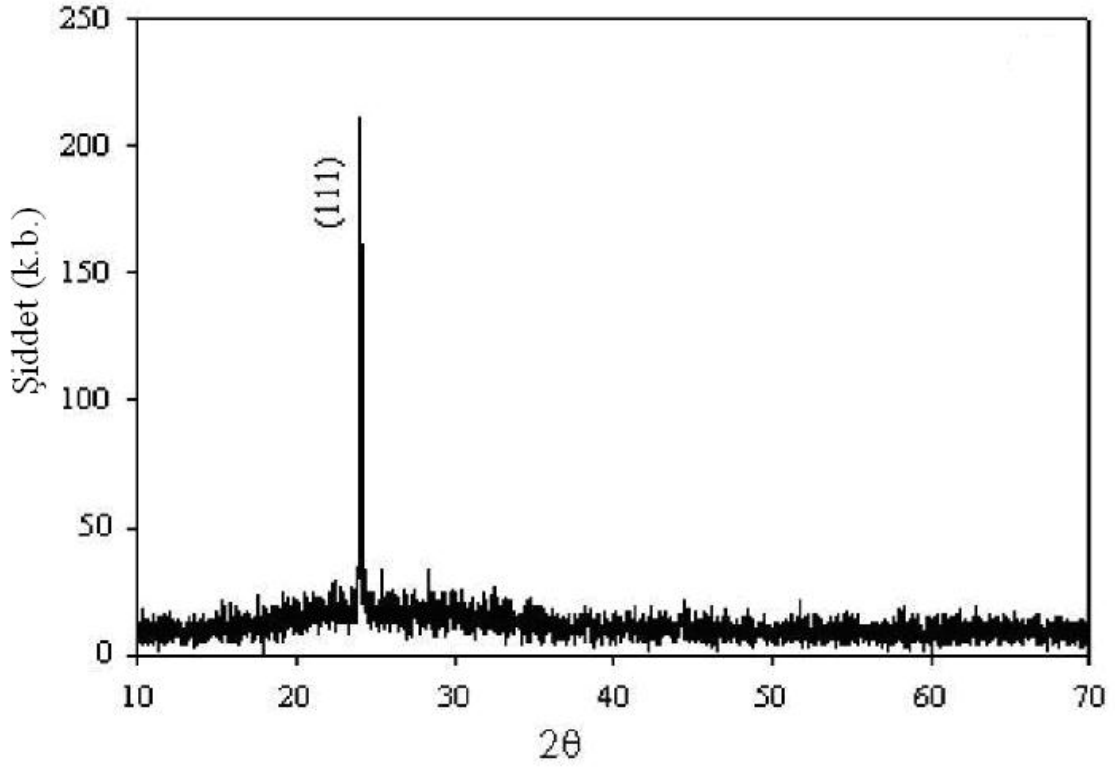
No.	d-spacing [Å]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Area [cts*°2Th.]	Tip width [°2Th.]	Pos. [°2Th.]	Pik Düzlemi
1	13.9863	100.2	0.551	6.83	54.45	0.56	6.3196	
2	3.73196	1467	0.118	100	170.91	0.12	23.844	(111) CdTe
3	2.34497	67.3	0.157	4.59	10.45	0.16	38.387	(220) küb., (110) Hex. CdTe
4	2.28888	90.18	0.098	6.15	8.75	0.1	39.366	
5	2.14458	32.11	0.236	2.19	7.48	0.24	42.137	
6	2.07348	163.8	0.276	11.16	44.52	0.28	43.654	
7	2.03023	522.3	0.079	35.6	40.56	0.08	44.634	(201)H CdTe
8	1.95216	59.27	0.197	4.04	11.51	0.2	46.521	
9	1.85393	27.8	0.236	1.89	6.48	0.24	49.145	
10	1.78781	59.38	0.945	4.05	55.33	0.96	51.09	
11	1.48385	8.83	0.945	0.6	8.23	0.96	62.604	
12	1.43282	20	0.315	1.36	6.21	0.32	65.103	
13	1.30158	177.5	0.157	12.09	27.56	0.16	72.642	(442)Küb., (330) Hex. CdTe
14	1.24732	20.08	0.236	1.37	4.68	0.24	76.352	
15	1.22242	13.04	0.472	0.89	6.07	0.48	78.198	
16	1.10565	32.51	0.551	2.22	17.67	0.56	88.417	
17	1.01179	13.56	0.576	0.92	10.42	0.48	99.162	

Kübik yapıdaki CdTe yarıiletkeninin (111) düzlemine ait pikinin FWHM değeri 0.118 dir. (2.11) bağıntısına göre ince filmdeki polikristal tanecik boyutları (0.07 μm) civarındadır. Kübük yapıda olan CdTe ince filmin düzlemler arası mesafesi $d=3,731\text{\AA}$ olup örgü parametresi $a=6,46\text{\AA}$ dur. XRD deseni hegzagonal yapı için incelendiğinde, tablodan (002) ve (110) pikleri için düzlemler arası mesafe sırası ile $d_{(002)} = 3.73196$ ve $d_{(110)} = 2.34497 \text{ \AA}$ değerleri kullanılarak, (2.10) bağıntısı yardımı ile bulunan örgü parametreleri $a= 4,689 \text{ \AA}$, $c = 7,463 \text{ \AA}$ büyüklüklerinde olup c/a oranı 1,591 olmaktadır.

3.4.2 CdTe Filme Ag Difüzyonunda Ag_2Te Fazının Oluşumu

Ag atomlarının, kübik yapıdaki CdTe filmde termal difüzyonu neticesinde oluşan Ag_2Te fazı daha belirgin bir şekilde XRD grafiklerinden belirlenmiştir. Yakın mesafeli süblimleşme yöntemi ile cam altlık üzerine kaplanan $3\mu\text{m}$ CdTe filmine ait XRD grafiği Şekil 3.21'deki

gibidir.

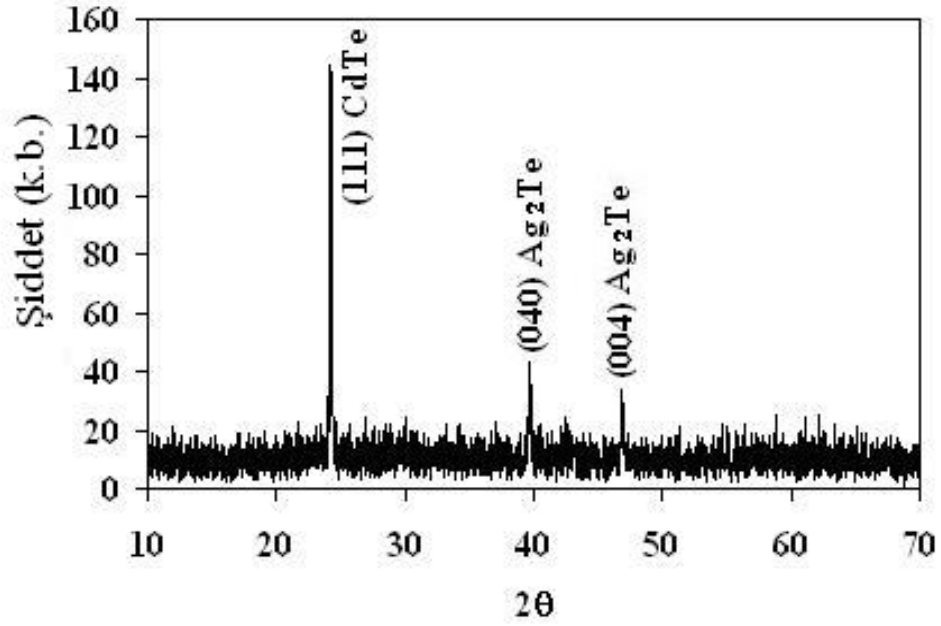


Şekil 3.21 Yakın mesafeli süblimleşme ile elde edilmiş CdTe ince filmin X-ışını kırınım deseni.

Şekil 3.21 kübik yapıya ait XRD grafiği olup polikristal tanecikler çoğunlukla (111) düzlemine yönelmişlerdir. Ag difüzyonunun bu yapıya etkisini incelemek amacı ile oldukça kalın olarak Ag (100nm) kaplanmış CdTe ince film 400°C de 10^{-3} torr vakumda tavladıktan sonra ölçülen XRD deseni Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere CdTe nin kübik yapısına ait (111) pikine ilaveten (040) ve (004) Ag_2Te fazına ait piklerde mevcuttur.

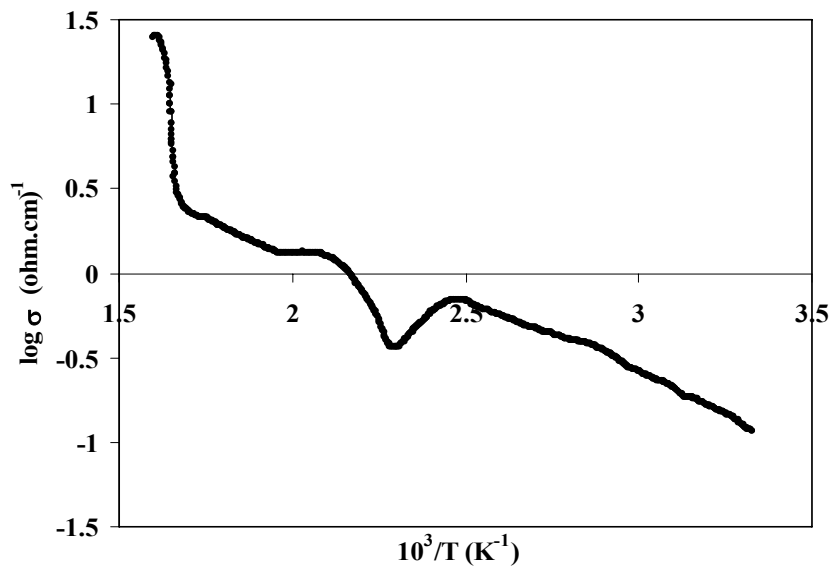
Piklerin şiddetlerinin oranı

$$\frac{I_{(040)}}{I_{(111)}} = 0,288 \text{ ve } \frac{I_{(004)}}{I_{(111)}} = 0,215 \text{ dir.} \quad (3.4)$$



Şekil 3.22 Ag katkılı CdTe yarıiletkenin X-ışını kırınım deseni ve Ag₂Te fazı.

Destekleyici çalışma olarak Ag katkı yapılmış CdTe örneğin iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi incelendi (Şekil 3.23). Termal difüzyonla Ag katkı yapılmış CdTe ince film numunenin iletkenliği sıcaklıkla artmakta fakat 145°C sıcaklık civarında iletkenliği keskin değişmektedir. Bu sıcaklık Ag₂Te fazının oluşma sıcaklığıdır olup Şekil 3.24’de faz diyagramında görülmektedir (Baker, 1999).



Şekil 3.23 Ag katkılı n-CdTe örneğin iletkenlik sıcaklık eğrisi.

3.4.3 Ag'nin CdTe Filmlerinde Difüzyonu

Ag metalinin CdTe ince filmde difüzyonunun sıcaklığa bağlı değişimini incelemek amacı ile CdTe üzerine Ag metali elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile buharlaştırıldı. Hazırlanan Ag/CdTe yapıların birbirine özdeş olmalarına dikkat edildi. Numuneler 10^{-3} torr vakumda 5 dakika tavlansarak metalin CdTe içine difüzyonu sağlandı. Hazırlanan numunelere ait fiziksel parametreler Çizelge 3.9 de verilmiştir.

Çizelge 3.9 Hazırlanan Au/CdTe örneklerin kalınlıkları ve tavlama sıcaklıkları

Sıcaklık °C	Ag kalınlığı nm	CdTe kalınlığı μm	Kaplanan Ag Alanı (cm ²)
350	50.2	5	0.25
450	50.2	5	0.27
500	50.2	5	0.28
550	50.2	5	0.28

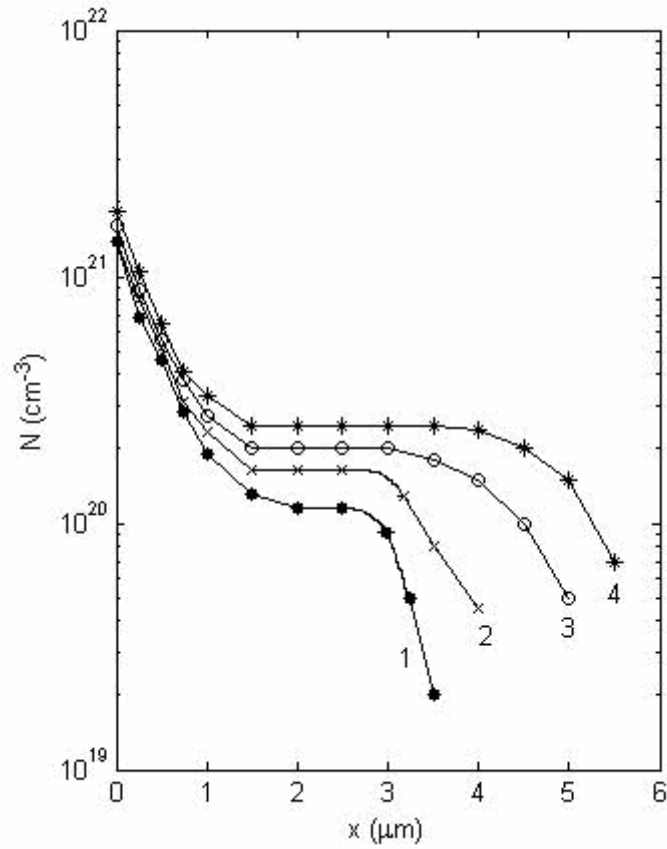
Difüzyon sonrası CdTe üzerinde kalan Ag metali asit ve mekanik parlatma ile temizlendi. Ag konsantrasyonun CdTe kalınlığına bağlı difüzyon profilini çıkartabilmek için örnek üzerinden 2-3(μm)'lik elmas parlatıcı ile mekanik olarak traş yapılarak yaklaşık 0.2(μm) kalınlıkta ince film halinde tabaka tabaka CdTe yarı iletkenini örnekten ayırarak XRF ölçümü yapıldı. XRF ölçümünde Ag, K-(β1) (22,159keV) pikinin şiddeti kullanılarak CdTe içindeki Ag konsantrasyonun kalınlıkla değişimi ölçüldü (Çizelge 3.10).

Çizelge 3.10 Ag K(-Beta1) pikinin kalınlıkla değişimi (Ag-K_{β1})

	XRF piki	Enerji
500°C	Ag, K-β1	22.159 keV
Polish işlem sırası	Örnek kalınlığı (mm)	Ag Pik şiddeti
1	0	320
2	0.22	295
3	0.44	280
4	0.66	259
5	0.88	246
6	1.1	228
7	1.32	232
8	1.54	237
9	1.76	265

10	1.98	211
11	2.2	208
12	2.42	105
13	2.64	170
14	2.86	123
15	3.08	103
16	3.3	113
17	3.52	92
18	3.74	36
19	3.96	34
20	4.18	23

350, 450, 500, 550°C sıcaklıklar da 5 dakikalık tavlama ile gerçekleştirilen difüzyonla hazırlanmış numunelerde aynı yöntemle Ag konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi ölçüldü. Bu sıcaklıklara ait Ag konsantrasyon profili Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



Şekil 3.25 (1) 350, (2) 400, (3) 450, (4) 500 °C sıcaklıklarında tavlama ile Ag metalinin CdTe filme difüzyonu sonrası Ag konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi.

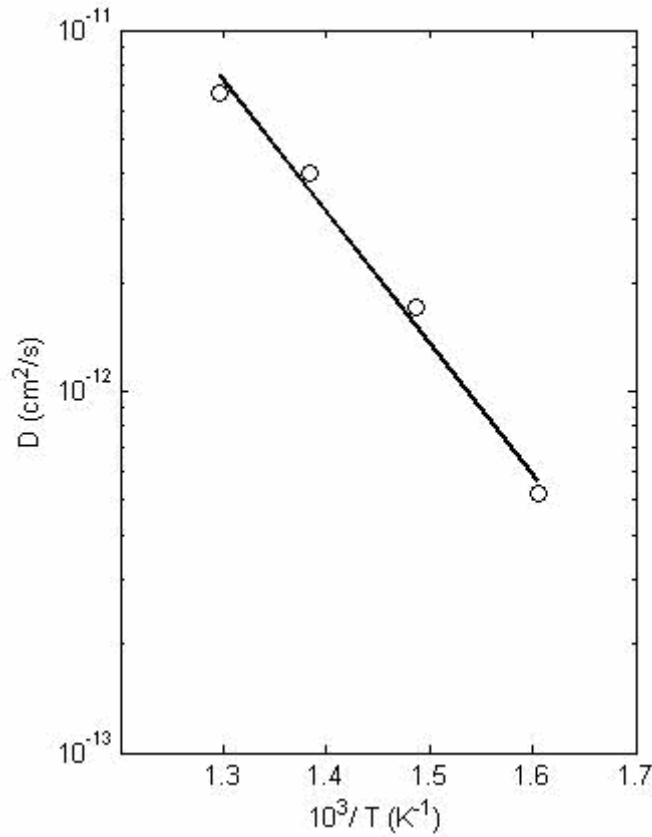
Şekil 3.25’den görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça Ag nin difüzyon derinliği artmaktadır. Aynı CdTe kalınlığına karşılık gelen Ag konsantrasyonu artmaktadır. Yarı logaritmik eksenle çizilen bu grafikte Ag nin CdTe içine difüzyonunda, tane yüzeyleri vasıtası ile büyük hızla yayılan ve aynı zamanda daha yavaş hızla tanelerin içine giren Au atomlarının hızlı ve yavaş olmak üzere iki mekanizma ile gerçekleşen difüzyonu söz konusudur.

Şekil 3.25 için kullanılan verilerden faydalanarak her bir sıcaklık için ince filmde yapılan difüzyona ait difüzyon katsayıları Çizelge 3.11 de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Ag’nin CdTe de farklı sıcaklıklardaki difüzyon katsayıları

Sıcaklık $10^3/K$	$D(\text{cm}^2/\text{s})$
1.605	$5,2 \times 10^{-13}$
1.486	$1,7 \times 10^{-12}$
1.383	$4,0 \times 10^{-12}$
1.297	$6,7 \times 10^{-12}$

Yarı logaritmik eksenle çizilen difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi $[D(\text{cm}^2/\text{s})-10^3/T(\text{K})]$ Şekil 3.26’da gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Ag’nin CdTe filmlerinde difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.

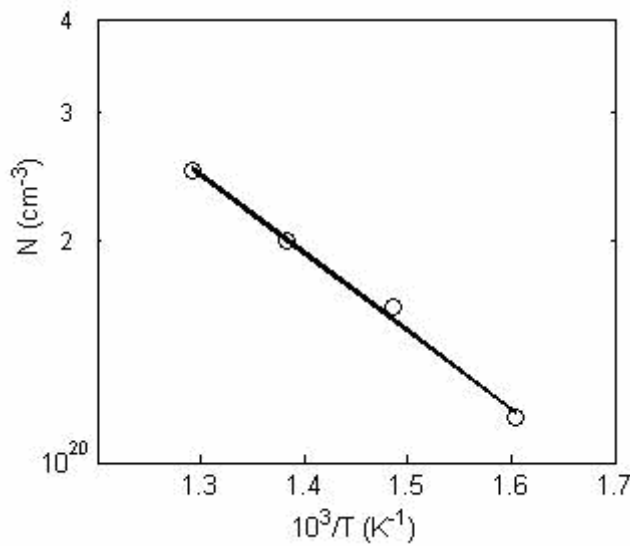
Ag metalinin CdTe de 350-550°C arasında etkin difüzyon katsayısı sıcaklık artıkça $5,2 \times 10^{-13}$ den $6,70 \times 10^{-12}$ cm²/s değerine artmaktadır. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişiminin Arrhenius bağıntısı ile ifadesi,

$$D(T) = 4 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0,72 \text{ eV}}{kT}\right) \quad (3.5)$$

şeklinde olup difüzyonun aktivasyon enerjisi 0,72eV ve difüzyon çarpanı $D_0 = 4 \times 10^{-7}$ cm²/s dir. Ag difüzyonunun aktivasyon enerjisinin, Au difüzyonunun aktivasyon enerjisinden daha büyük olması, Ag un CdTe de difüzyon sürecinde Ag₂Te yeni fazın oluşması neden olabilir.

Ag metalinin 350-550°C sıcaklıkları arasında CdTe çözünürlüğü XRF ölçümlerinden elde edilmiştir. Termal difüzyon sonrası yüzeyde kalan Ag metali %30 seyreltik HNO₃ (HNO₃) asit çözeltisi ile temizlendikten sonra yüzeydeki Ag konsantrasyonu XRF piki ile belirlendi. Ag konsantrasyonun CdTe de sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.27’de verilmiştir.

Sıcaklık arttıkça örnek yüzeyindeki Ag konsantrasyonu artmaktadır.



Şekil 3.27 Ag metalinin CdTe filmde çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi.

Çözünürlüğün sıcaklıkla değişimini veren Arrhenius ifadesi

$$N(T) = 6,9 \times 10^{21} \exp\left(-\frac{0,22}{kT}\right) \quad (3.6)$$

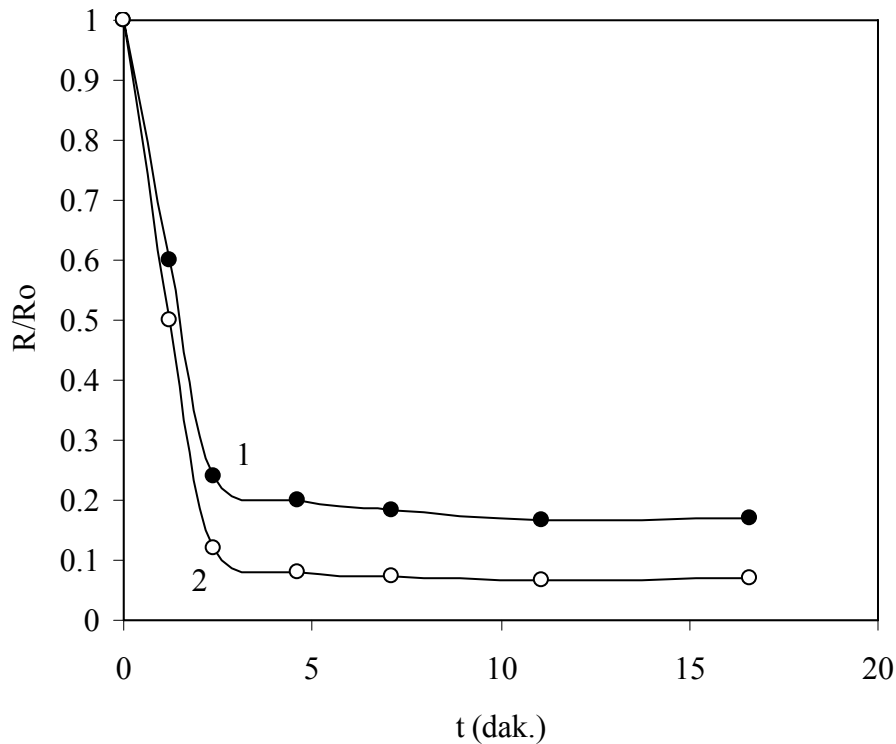
Şeklinde olup N nin birimi (atom/cm³) dür. İncelenen sıcaklık aralığında Ag nin CdTe ince film yüzeyinde çözünürlüğünün artması bu metalin difüzyonunu zorlaştıracaktır ve yavaşlatacaktır. Bu nedenle Ag nin CdTe de difüzyonu yüzeyde yavaş difüzyon ve film

derinliğinde hızlı difüzyon olarak belirlenmiştir.

3.4.4 Gümüşün nCdTe Filmlerde Işıkla Uyarılmış Difüzyonu

Ag metalinin n tipi CdTe filmde termal ve foto difüzyonunu incelemek amacı ile özdeş olarak hazırlanmış iki n tip CdTe numunesi aynı altlık üzerine hazırlandı ve üzerlerine elektron demeti yöntemi ile 50 nm kalınlıkta Ag kaplandı. Örneklerden biri termal olarak difüzyona, diğer örnekte aynı sıcaklıkta olup sadece tungsten-halojen lambanın ışığının etkisi ile foto difüzyona maruz bırakıldı. Tüm sistem 1,3 Pa basınçta bulunan vakum içinde bulunmaktadır. Örnekler 280, 320, 370 ve 430°C sabit sıcaklıklarda foto ve termal tavlama etkisi ile 5 er dakikalık süreler ile arka arkaya difüzyona maruz bırakıldı. Difüzyon sonrası kalan Ag metali (5HNO₃, 1H₂O) asit çözeltisi ile örnekten uzaklaştırıldı ve dörk kontak yöntemi ile örneklerin direnci okundu.

320°C sabit sıcaklıkta foto ve termal difüzyona maruz kalan Ag kaplı örneğin iletkenliğinin tavlama zamanı ile değişimi Şekil 3.28'deki gibidir.



Şekil 3.28 320°C sabit sıcaklıkta (1)termal ve (2) foto difüzyon etkisi ile CdTe (Ag) örneğin direncinin tavlama zamanı ile değişimi

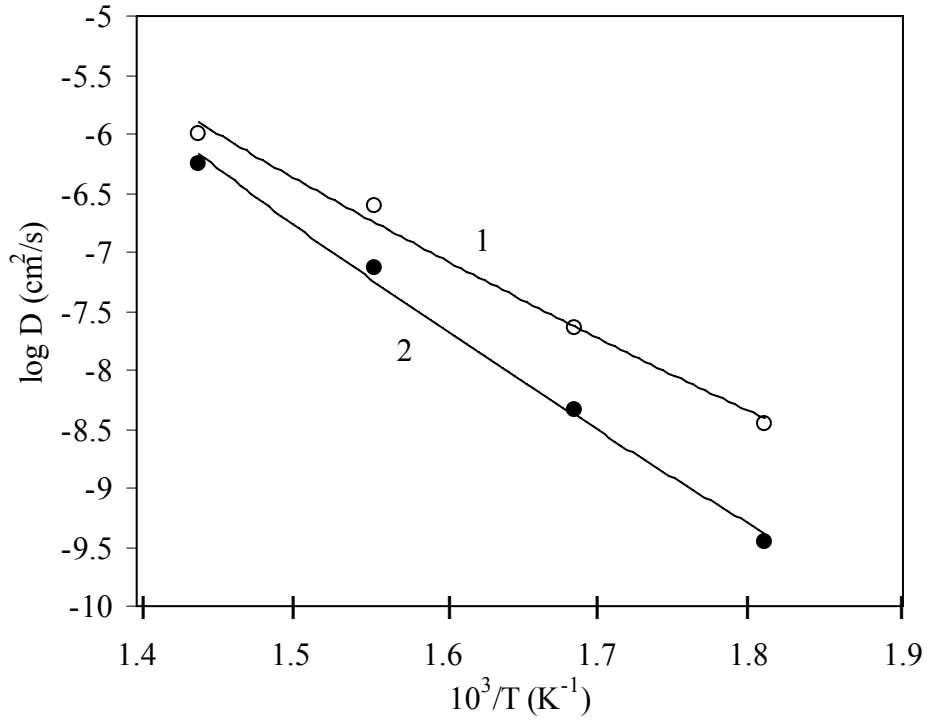
Şekilden görüldüğü üzere foto difüzyona maruz bırakılan örneğin direncinin azalmasındaki

değişim oranı termal difüzyona maruz bırakılan örneğin direncindeki değişim oranından büyüktür. Isıkla uyarılmış difüzyonda direncin bu hızlı değişimi Ag atomlarının foto-iyonizasyonu ile açıklandı. Ag atomlar difüzyon sürecinde n tipi CdTe filmlerde arayere yerleşir, donör etkisi gösteren bu durum n tip filmde direncin azalmasına sebep olur (Zanio, 1978 ve Lyubomirski vd., 1997)

280, 320, 370 ve 430°C sıcaklıkları için yapılan benzer işlemlerden sonra, direncin tavlama zamanına bağlı olarak değişimi ile Ag metalinin CdTe filmine foto ve termal difüzyon katsayısı,

$$D = \left(\frac{h^2}{4} \right) \left(\frac{d \left(\frac{R}{R_0} \right)}{d(\sqrt{t})} \right) \quad (3.7)$$

(Dzhafarov, 1991 ve Abdullaev, 1987), bağıntısından elde edildi. Burada (t) tavlama zamanı R_0 örneğin üzerinde hiçbir işlem yapılmadığı durumda (difüzyon öncesi $t=0$) sahip olduğu direnç R ise difüzyon sonrası direncidir ve h Planck sabitidir. Her bir sıcaklık için hesaplanan difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29 Ag nin CdTe filmde etkin (1) termal ve (2) foto difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.29'daki grafiklerden elde edilen verilere göre termal ve foto difüzyon katsayılarının Arrhenius ifadesi,

$$D_{foto} = 8.7 \times 10^3 \exp\left(-\frac{1.36 \text{ eV}}{kT}\right) \quad (3.8)$$

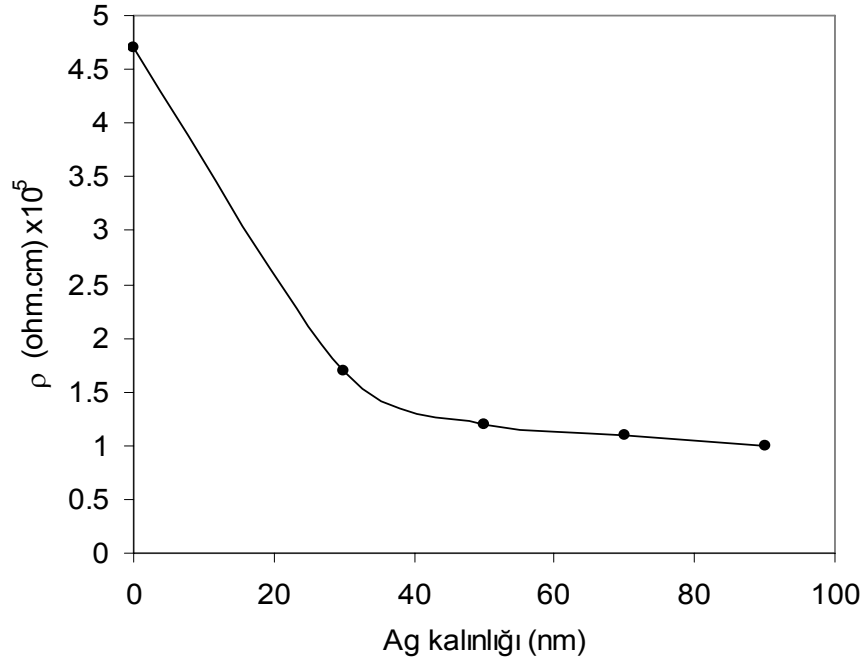
$$D_{termal} = 1.9 \times 10^5 \exp\left(-\frac{1.6 \text{ eV}}{kT}\right) \quad (3.9)$$

Işıkla uyarılmış difüzyonda Ag nin etkin difüzyon katsayısı, termal difüzyon katsayısından yaklaşık 4-6 kat daha büyüktür. Işığın etkisi ile Ag atomlarının difüzyonunun daha hızlı olmasının nedeni, gümüş atomlarının fotoiyonlaşması ve buna bağlı olarak oluşan daha küçük yarıçaplı Ag iyonlarının daha kolayca örgüdeki arayer pozisyonlar vasıtası ile yayılması ile açıklandı (Lyubomirski vd. 1997 ve Wartlick vd., 2000).

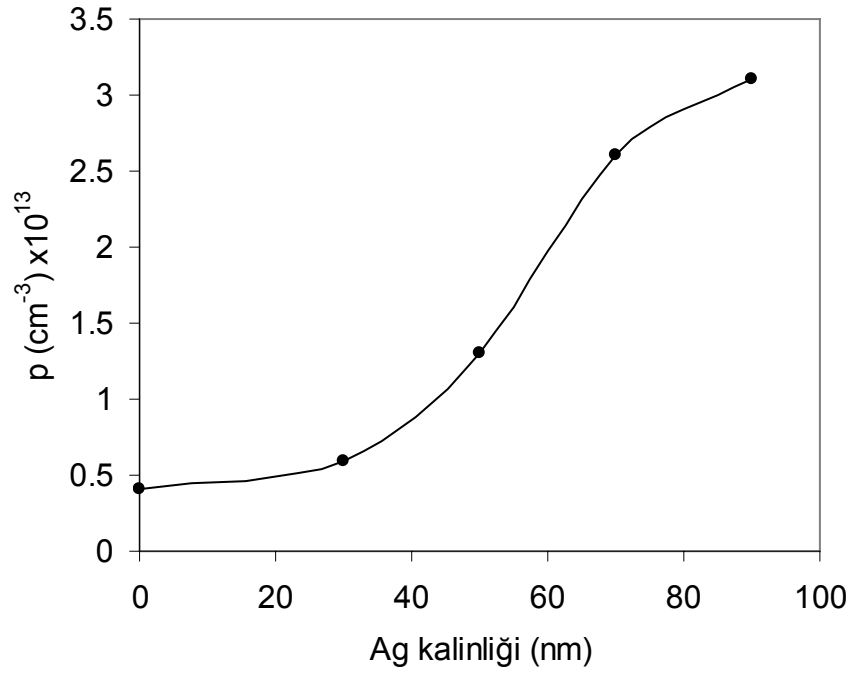
3.5 Ag Katkılı CdTe Filmlerin Elektriksel Karakteristikleri

Ag katkısının CdTe filmlerin elektriksel karakteristiklerine etkisini incelemek amacı ile 30, 50, 70 ve 90 nm kalınlıklarında Ag metali CSS ile elde edilen 4µm kalınlıktaki CdTe film örneği üzerine kaplandı. Her numune 400°C de 1 saat tavlanaarak CdTe filmine Ag katkısı yapıldı. Tavlama sonrası CdTe üzerinde kalan Ag metali (5HNO₃, 1H₂O) asit karışımı ile temizlendi. Her numune için Van der Pouw yöntemi ile öz direnç, Hall yöntemi ile konsantrasyon ve mobilite ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçları Çizelge 3.12'de verilmiştir. Kaplanan Ag kalınlığının CdTe nin öz direncine etkisi Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

Katkı olarak kullanılan Ag metalinin kalınlığı arttıkça CdTe filmin öz direnci azalma göstermektedir. Bununla birlikte kaplanan Ag kalınlığı arttıkça buna bağlı olarak Ag katkı atomları sayısı artmakta ve CdTe filmde yük taşıyıcı konsantrasyonu da artmaktadır (Şekil 3.31).



Şekil 3.30 Ag filmin kalınlığının CdTe öz direncine etkisi.



Şekil 3.31 Ag filmin kalınlığının CdTe yük taşıyıcı konsantrasyonuna etkisi.

CdTe filmin iletkenlik tipi Ag katkısı öncesi p-tipi olup Ag katkısı sonrası da p-tipi olarak kalmıştır. Ag katkısı, CdTe de yük taşıyıcıların mobilitesini azaltmaktadır.

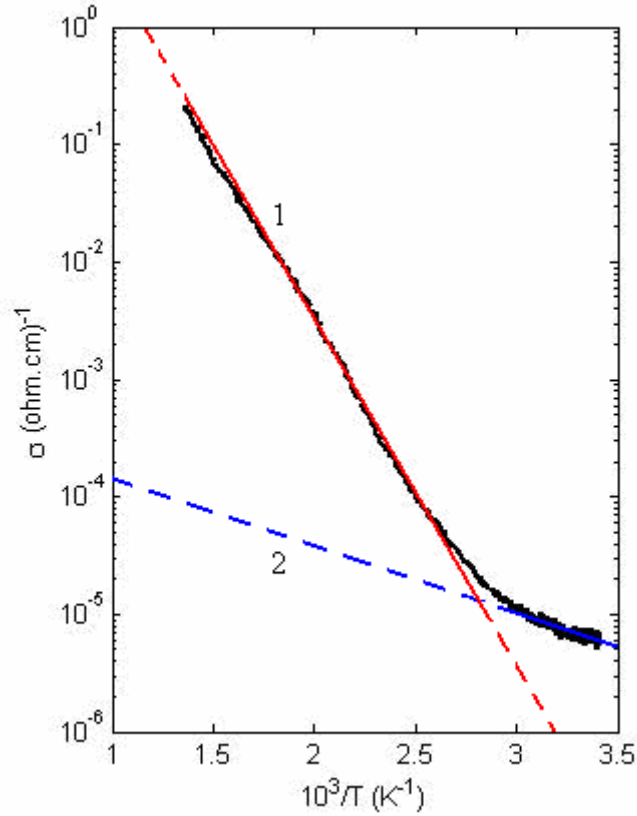
Çizelge 3.12 Ag kalınlığının CdTe filmin elektriksel özelliklerine etkisi

Ag	Temiz CdTe	30nm	50nm	70nm	90nm
Özdirenç (ohm.cm) $\times 10^5$	4.7	1.7	1.2	1.1	1
iletkenlik (ohm.cm) $^{-1} \times 10^{-6}$	2.1	5.78	8.15	9	10
p (cm $^{-3}$) $\times 10^{13}$	0.41	0.59	1.3	2.6	3.1
mobilité (cm ^{2} V $^{-1}$ s $^{-1}$)	141.49	93.97	24.47	30.61	42.56

3.5.1 Ag ile Katkılanmış CdTe Filmin İletkenlik-Sıcaklık Eğrisi

Tavlama yöntemi ile termal difüzyonla katkılanan CdTe ince filmlerde Ag katkının CdTe filmin yasak enerji aralığındaki yerini belirlemek için iletkenlik- sıcaklık ölçümleri yapıldı. Bunun için yakın mesafeli süblimleşme ile üretilen CdTe ince film (3 μ m) üzerine 50nm kalınlıkta Ag metali kaplandı ve vakumda 400°C de, 1 saat tavlandı. Termal difüzyon sonrası CdTe üzerinde kalan Ag metali asit çözeltisi ile temizlendi. Örneğin iletkenlik tipi p olarak ölçüldü. Ölçümde sıcaklık, oda sıcaklığından 450°C ye kadar olup faz geçişi ve yapısal kusurların artması nedeni ile daha yüksek sıcaklıklarda ölçüm yapılmadı.

Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen iletkenlik- sıcaklık grafiği Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça örneğin iletkenliği üstel olarak artmaktadır. Şekil 3.32’de görülen Ag katkılı CdTe ye ait iletkenlik sıcaklık eğrisi, Şekil 3.13’deki katkısız CdTe’ye ait iletkenlik sıcaklık eğrisi ile kıyaslanırsa, iki eğim görülecektir. Grafikte görülen 1 numaralı eğim den hesaplanan 1,42eV CdTe nin yasak enerji aralığını vermektedir. 2 numaralı eğim den hesaplanan enerji ise 0,18eV olup Ag katkısına aittir. Ag katkısı ile CdTe nin yasak bandı içinde valans seviyede yukarıda 0,18eV luk ilave katkı seviyesi meydana gelmektedir $E_a(\text{Ag}) = E_v + 0,18 \text{ eV}$. Ölçüm sonrası örneğin iletkenlik tipi p olduğundan Ag katkısı Akseptör özellik göstermektedir.

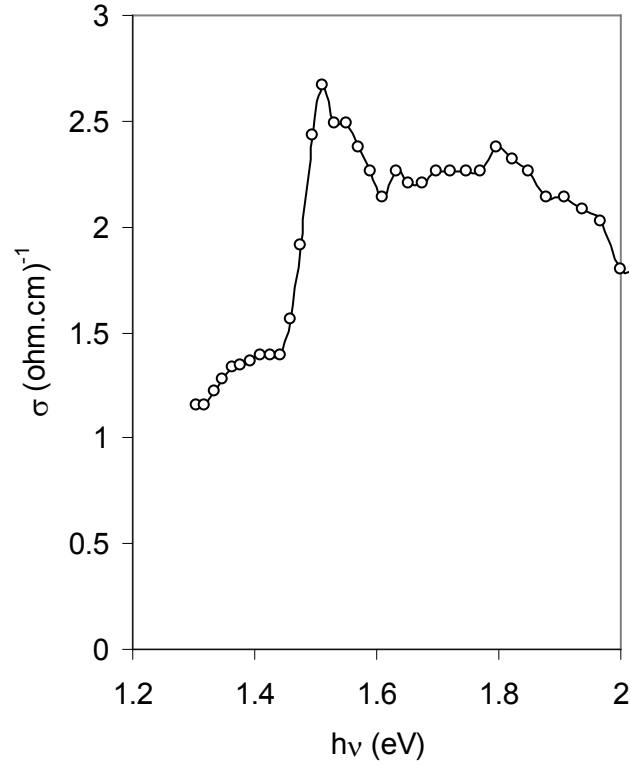


Şekil 3.32 Ag katkılı CdTe ince film yarıiletkenin $(\sigma \cdot 10^3/T)$ eğrisi. (1) eğrinin eğimi yasak enerji aralığını, 2 numaralı eğrinin eğimi katkı seviyesini göstermektedir.

3.5.2 Ag ile katkılanmış CdTe Filmin Foto-iletkenlik ve Optik Absorpsiyon Spektrumları

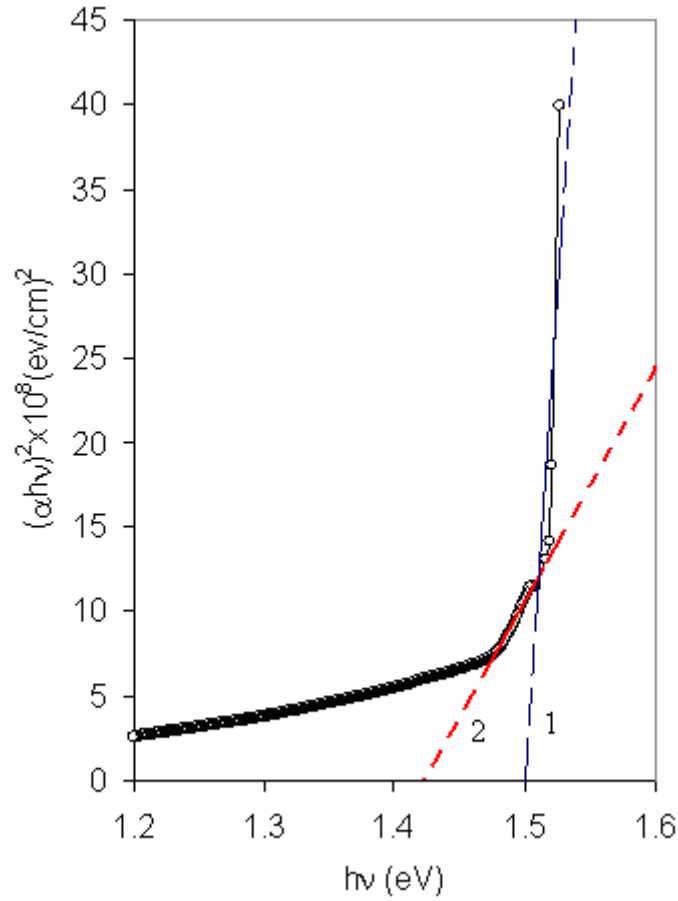
Tavlama ile 3 μm kalınlıkta CdTe örneğe 50nm Ag katkısı yapıldıktan sonra iletkenliğin foton dalga boyuna bağlı değişimi incelendi. Gelen fotonun direkt katkılı bölge üzerine düşürülerek yapılan iletkenliğin dalga boyuna bağlı değişimi ölçümü Şekil 3.33’de verilmiştir.

Örneğin iletkenliği 1.32 eV da artmaya başlamış 1.43 eV değerine kadar artma devam etmektedir. Fotoiletkenliğin bu bölgedeki artışı, CdTe un yasak bandın alt tarafında yerleşen Ag un akseptör seviyesinin $E_a = E_v + 0.18$ eV iyonlaşması ile yorumlanmıştır. Daha yüksek enerjilerde (1.5eV) foto iletkenlik ani bir artış göstermektedir bu değer CdTe örneğin yasak bandını vermektedir.



Şekil 3.33 450°C’de 1 saat tavlanarak Ag ile katkılanmış CdTe filmin fotoiletkenlik spektrumu.

Diğer taraftan aynı şartlarda hazırlanmış Ag katkılı CdTe örneğin optik absorpsiyon spektrumu Şekil 3.34’de gösterilmiştir. Bu grafikte gösterilen absorpsiyona ait iki eğimden büyük olanı CdTe ince film yarıiletkenin yasak enerji aralığını 1,5eV, ikinci eğimde Ag katkı düzeyi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyesini (1,41eV) vermektedir.



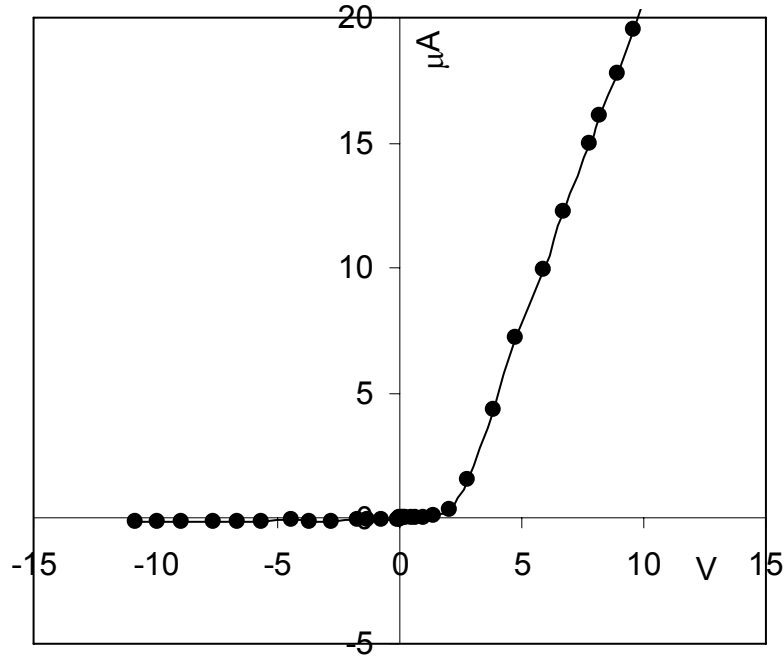
Şekil 3.34 450°C’de 1 saat tavlانarak Ag ile katkılanmış CdTe filmin absorpsiyon spektrumu.

Bu ölçüm den katkı seviyesinin yeri, ($E_a = E_v + 0.09 \text{ eV}$ tur)

Yapılan iletkenlik- sıcaklık, foto-iletkenlik ve absorpsiyon ölçümlerinde Ag katkısı sırası ile 0,18eV, 0,12eV ve 0,09eV seviyelerde CdTe filmin bant diyagramında akseptör katkı olarak görülmektedir. İletkenlik-sıcaklık ölçümlerinden elde edilen enerji seviyesinin daha yüksek olmasının nedeni, fotoiletkenlik ve optik spektrumlarından elde edilen enerji seviyelere göre, bu ölçülerin değeri $T=0 \text{ K}$ sıcaklığına ait olmasıdır.

3.5.3 Ag/pCdTe Yapının Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri

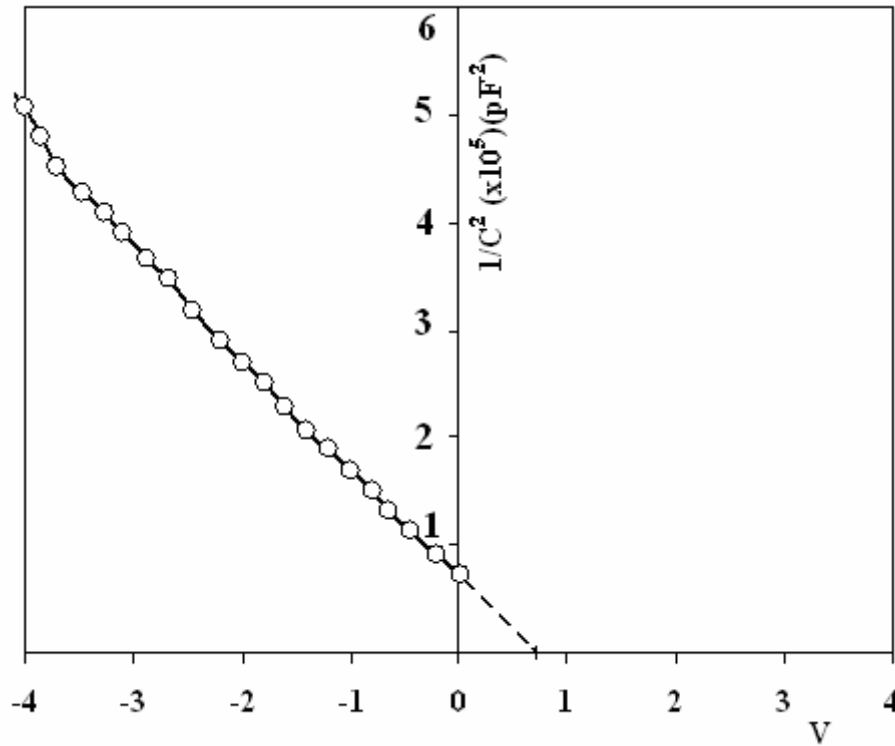
Ag/pCdTe eklem çalışmasında $4\mu\text{m}$ kalınlığında CdTe üzerine 50nm Ag kaplandıktan sonra 400°C de 1 saat tavlandı. Elde edilen Ag/CdTe eklem GaIn sıvı metali ile omik kontak yapılarak karanlıkta akım-gerilim karakteristiği ölçüldü (Şekil 3.35). (2.26) bağıntısına göre engel yüksekliği $(\phi_b)=0.83\text{eV}$, doyma akım yoğunluğu $J_s = 3,7 \times 10^{-8} \text{A/cm}^2$ ve (2.28) bağıntısından ideallik faktörü $\beta = 1,9-10$ olarak hesaplandı. İdeallik çarpanının 1 den uzaklaşması arınma bölgesindeki jenerasyon ve rekombinasyon akımının oluşumuna bağlandı. Ag/pCdT eklem ışığa az derecede duyarlılığı gözlenmiştir. Bunu eklem sınır bölgesinde, tavlama neticesinde yeni Ag_2Te fazın oluşumu ile yorumlamak mümkündür.



Şekil 3.35 Ag/CdTe eklem karanlıkta akım- gerilim karakteristiği.

Bu çalışma ile birlikte Ag/p-CdTe örneği için 1 MHz frekansta kapasitenin gerilimle (C-V) değişimi incelendi. Ag/CdTe yapının $(1/C^2-V)$ grafiği Şekil 3.36'da gösterilmiştir. $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-2} \text{ pf/cm}$ ve CdTe için $\epsilon = 10,2$ ve yüzey alanı $0,29 \text{cm}^2$ olmak üzere, (2.37) bağıntısına göre Akseptör konsantrasyonu $1,4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Engelin yüksekliği Şekil 3.36'da grafiğin apsis eksenini kestiği değer olup $0,7 \text{eV}$ olarak belirlenmiştir.

I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliklerindeki küçük fark metal-yarıiletken ara yüzde rekombinasyon merkezlerinin sayısının fazla olmasına bağlıdır.



Şekil 3.36 Ag/p-CdTe eklem kapasitans-(ters)gerilim grafiği.

Ag metalinin p tipi CdTe de Schottky eklem özelliği göstermesi eklem ait band diyagramından anlaşılmaktadır. Ag metalinin çıkış işi 4,7eV değerindedir. CdTe yarıiletkenin afinitesi $X_{CdTe}=4,3\text{eV}$ olup elde ettiğimiz örneklerin iletkenlikleri $10^{-5} (\text{ohm.cm})^{-1}$ civarındadır. Bu durumda p tip CdTe nin yük taşıyıcı konsantrasyonu, yaklaşık $7,0 \times 10^{11} (\text{cm}^{-3})$ ve oda sıcaklığındaki fermi seviyesi $E_f = 0,44\text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre p tip CdTe nin termodinamik çıkış işi,

$$\Phi_{CdTe} = (E_g - E_f) + X_{CdTe} = (1,5 - 0,44) + 4,3 = 5,36 \text{ eV} \quad (3.10)$$

olarak hesaplandı.

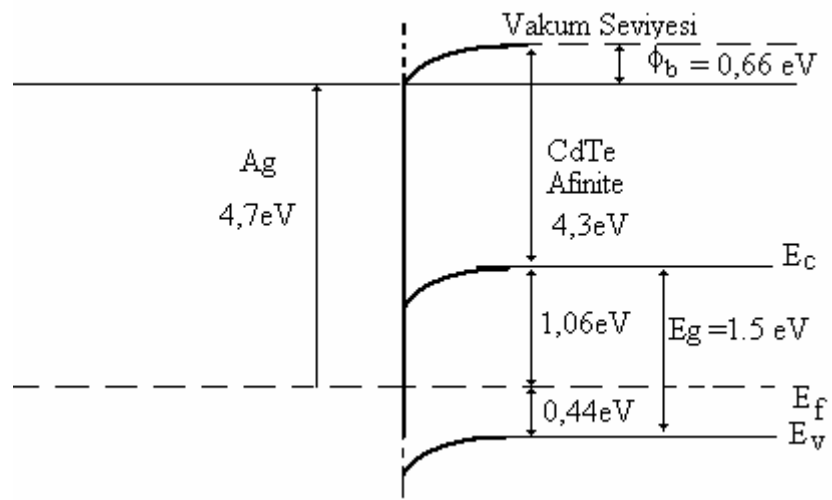
Bu durumda Ag metali le CdTe arasında oluşacak eklem bariyer yüksekliği,

$$\Phi_b = \Phi_{Au} - \Phi_{CdTe} \quad (3.11)$$

bağıntısından,

$$\Phi_b = 5,36 - 4,7 = 0,66 \text{ eV}$$

büyükliğünde olmaktadır. Ekleme ait bant diyagramı Şekil 3.37’de gösterilmektedir..



Şekil 3.37 Ag/pCdTe eklem bant diyagramı. Bariyer yüksekliği 0,66eV dir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

CdTe yarıiletkeni ile yapılan güneş pilleri, x-ışını detektörleri ve gamma-ışını detektörleri gibi elektronik aletlerin çalışma sürecindeki kararlılığı, bu yarıiletken için kullanılan omik kontakların difüzyon katsayısı ile doğrudan ilgilidir. CdTe ince film esaslı yarıiletken aletlerin yapılmasında Au ve Ag metalleri, Schottky eklem veya omik kontak malzemesi olarak sıkça kullanılmaktadır (Birkmire vd., 2001 ve Hage vd., 1955). Özellikle, CdTe yarıiletkeni ile yapılan güneş pillerinde omik kontak olarak Au ve Ag metalleri tercih edilmektedir. Bu nedenle ilk defa bu çalışmada, yakın mesafeli süblimleşme yöntemi ile elde edilen CdTe yarıiletken filmlerine Au ve Ag metallerinin difüzyonu XRF yöntemi ile belirlenmiştir, bununla birlikte difüzyon yöntemi ile yapılan Au ve Ag katkıların CdTe filmlerin yapısal, elektrik ve optik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

X-ışını kırınımı ölçümleri ile katkısız CdTe filmlerin kristalik yapısının polikristal kübik ve hekzagonal yapıda olduğu gösterilmiştir. Hekzagonal yapıya ait parametreler çizelge 4.1 de kübik yapıya ait parametreler çizelge 4.2 de verilmiştir.

Hekzagonal CdTe için a, c ve c/a değerleri

Çizelge 4.1 Hekzagonal yapıdaki CdTe filmin örgü parametreleri.

A°	Katkısız CdTe	Au/CdTe	Ag/CdTe
d (002)	3.74213	3.74497	3.73196
d (110)	2.34455	2.34369	2.34497
a (Å)	4.68	4.68	4.68
c (Å)	7.48	7.48	7.46
c/a	1.59	1.59	1.59

Hekzagonal yapıdaki katkısız CdTe numune ile, Au ve Ag metalinin difüzyonu sonrası elde edilen Au, Ag katkılı CdTe numunelerde, a ve c örgü parametreleri değişikliğe uğramamıştır. Pandey ve diğerleri, pulsed laser deposition (PSD) tekniği ile cam ve SnO₂ kaplı cam üzerine farklı atlık sıcaklıklarında kapladıkları CdTe filmin laserin enerjisine bağlı olarak hekzagonal yapı ile kübik yapıda ince film elde etmişlerdir. Hekzagonal yapı için örgü parametrelerini a=4,58Å ve c= 7,47Å olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 4.2 Kübik yapıdaki CdTe filmin örgü parametreleri.

	Katkısız CdTe	Au/CdTe	Ag/CdTe
d(111)	3.74213	3.74497	3.73196
a (Å)	6.48	6.48	6.46

Benzer şekilde kübik yapıdaki katkısız ve katkılı CdTe filmlerin a örgü parametresinin büyük oranda değişmediği görülmüştür. Chandramohan vd. (2006) diğerleri, paslanmaz çelik ve molibden altlık üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile kapladıkları CdTe filmin hem hekzagonal hemde kubik yapıda olduklarını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada 0,8µm kalınlıkta hem hexagonal hemde kübik piklerin birlikte bulunduğunu kalınlık arttıkça 10µm yapının büyük oranda kübik özellik kazandığını belirtmişlerdir, kübik yapıya ait buldukları örgü parametresi, 0,8µm CdTe kalınlığı için $a=6,46\text{Å}$, 10µm CdTe kalınlığı için, $6,78\text{Å}$ ’dır. Tanecik boyutu 0,8 µm ve 10µm kalınlıktaki CdTe için sırası ile 14 ve 18nm dir.

İçinde sadece kübik yapı içeren polikristal CdTe yapıda taneciklerin çoğunluğunun (111) kristalografik eksen boyunca yönlenmiş olduğu tespit edilmiştir. Kübik CdTe filmin örgü parametresi $a=0,6408\text{nm}$ ve ortalama tanecik boyutları yaklaşık olarak 0,1µm olarak belirlenmiştir.

Elektriksel ölçüm sonucu, yakın mesafeli süblimleşme ile üretilen ve üzerinde hiçbir işlem yapılmamış p-CdTe ince filmlerin 10^{11}ohm.cm değerinde yüksek öz dirence sahip olduğu belirlenmiştir. CdTe yarıiletkeninin çıkış işi 4,2-4.3 eV civarında olup oldukça büyüktür, buna bağlı olarak p-CdTe yarıiletkenin termodinamik çıkış işi 5,7-5,8 eV büyüklüğünde olup herhangi bir metalin iş fonksiyonundan büyüktür. Bu nedenle pCdTe yarıiletkenine uygun omik kontak metalini belirleme çalışması yapıldı. İncelenen metaller arasında (Cu, Ag, Al ve GaIn) GaIn sıvı metali 9.16 ohm.cm^2 değerinde en küçük kontak direncine sahip olduğu belirlenmiştir. GaIn/pCdTe eklemine kontak direncini düşürmek için kontak metal uygulanmadan önce örnek yüzeyinde $\text{HNO}_3\text{-H}_3\text{PO}_3$ (NP) asit karışımı ile aşındırma yapıldı.

pCdTe ve nCdTe filmlerin öz direncini düşürmek amacı ile p tipi örnek CdCl_2 ortamında tavlandı (400°C de 30 dakika) diğer taraftan n tipi örneğe In difüzyonu (350°C de 15 dakika) yapılarak öz dirençleri düşürülmüştür. Bu işlemler neticesinde CdCl_2 katkılı pCdTe numunenin öz direnci 10 kat, In katkılı nCdTe numunenin öz direnci 10^6 kat azalmıştır.

Au ve Ag metallerinin termal difüzyon yöntemi ile CdTe ince film örneklerine katkılanması sonucunda yapılan XRD ölçümlerinde katkısız CdTe de olduğu gibi hem kübik hemde hekzagonal CdTe fazının piklerinin olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte polikristal taneciklerinin (111) kristalik yönelmeleri bozulmaktadır. XRD ölçüm sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda Au ile katkılanmış CdTe ince filmde polikristal taneciklerinin ortalama büyüklüğü 0,091µm, Ag ile katkılanmış CdTe ince filmde taneciklerin ortalama büyüklüğü 0.076µm dir. Difüzyonun tanecik boyutlara etkisinin olduğu düşünülmemektedir. Ayrıca Ag ile katkılanmış CdTe ince film yapıda yeni fazlara ait pikler bulunmaktadır. Ag katkılı filmde Ag₂Te fazı oluşmaktadır. Faz geçişi kübik yapıdaki CdTe filmde belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Bununla birlikte ayrıca Ag katkılı CdTe yapı için yapılan iletkenlik-sıcaklık ölçümünde, Ag₂Te fazının oluşma sıcaklığı olan 140-150°C aralığında iletkenliğin hızlı değişimi görülmüştür. İletkenlikteki bu değişim yeni fazın oluştuğunu göstermektedir (Şekil 3.23). Bu durum Ag/CdTe eklem tavlama sürecinde, Ag nin reaktif difüzyonu diğer bir ifade ile Ag katkının CdTe yapıdaki ana atomlar ile karşılıklı etkileşmesi sonucunda Ag₂Te fazlarının oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan yeni faz eklem performansını etkileyecektir.

Au ve Ag atomlarının CdTe filmlerde 350-550°C sıcaklık aralığında termal difüzyonu incelenmiştir. Katkıların CdTe filmde konsantrasyon dağılımları, XRF yöntemi kullanılarak, örneklerden seri olarak arka arkaya ince tabakalar çıkarılarak Au-K_{α1}, Au-L_{β1} ve Ag-K_{α1} piklere ait şiddetlerin ölçümü ile yapılmıştır.

Elde edilen ölçüm sonucuna göre Au metalinin CdTe filmlerde konsantrasyon dağılımı, sabit kaynaktan difüzyon için verilen,

$$N(x) = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4.1)$$

denklemine uymaktadır. Au'nun CdTe de difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi aşağıdaki Arrhenius ifadesine uymaktadır.

$$D(T) = 4.4 \times 10^{-7} \exp \left(-\frac{0.54 \text{ eV}}{kT} \right) \quad (4.2)$$

Ag metalinin CdTe ince filminde termal difüzyonu ise sabit kaynaktan oluşan difüzyon kuralına uymamaktadır. Bu durumun nedeni Ag/CdTe yapıda tavlama sürecinde, Ag atomlarının CdTe ana atomlarından Te ile güçlü etkileşmesi nedeni ile yeni fazın (Ag₂Te)

oluşmasıdır. Diğer bir ifade ile Ag nin CdTe filminde serbest difüzyon mekanizması ile değil, reaktif difüzyon mekanizması ile gerçekleşmektedir.

Gümüş metalinin etkin difüzyon katsayısı sıcaklıkla değişimi XRF yöntemi ile belirlendi ve

$$D(T) = 4 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{0.72 \text{ eV}}{kT}\right) \quad (4.3)$$

şeklinde Arrhenius denklemi ile ifade edildi.

Ag metalinin difüzyon aktivasyon enerjisi (0.72eV) olup Au metalinin aktivasyon enerjisinden (0.54eV) daha büyük olup etkin difüzyon katsayısı 10^{-10} kat daha küçüktür. Bu durum yine Ag atomlarının difüzyon sürecinde Te atomları ile etkileşmesi sonucunda difüzyonun Au metaline göre daha zor olması ile açıklanmaktadır. Difüzyon ölçümleri sonucu elde edilen bu sonuçlar XRD ölçüm sonuçları ile desteklenmektedir.

Gümüşün Ag/CdTe yapılarda ışıkla uyarılmış difüzyonu 280-420°C sıcaklık aralığında incelenmiştir.

Işıkla uyarılmış yapıda Ag nin etkin difüzyon katsayısı, termal difüzyon katsayısından yaklaşık 4-6 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Işığın etkisi ile Ag atomlarının difüzyonunun daha hızlı olmasının nedeni, gümüş atomlarının foto-iyonlaşması ve buna bağlı olarak oluşan daha küçük yarıçaplı Ag iyonlarının daha kolayca örgüdeki arayer pozisyonlar vasıtası ile yayılması ile açıklanmıştır.

Au ve Ag metallerinin CdTe ince film polikristal içine difüzyonu hızlı ve yavaş olarak iki bileşen ile gerçekleşmektedir. Difüzyon sürecinde metalin tanecik yüzeylerinden hızlı ilerleyişi olmakta, taneciklerin içine difüzyonu daha yavaş olarak gerçekleşmektedir. Sabit sıcaklıkta iletkenliğin zamanla değişiminden elde edilen termal difüzyon katsayısı, XRF yöntemi ile yani konsantrasyonun kalınlıkla değişiminden elde edilen yöntemle bulunan difüzyon katsayısından büyüktür. Bunun nedeni, sabit sıcaklıkta iletkenliğin zamanla hızlı değişimi, difüzyonun hızlı bileşeni olan tane yüzeyleri arasına difüzyondan kaynaklanmasıdır. Buna bağlı olarak difüzyon katsayısı büyük olmaktadır. Konsantrasyon değişimi yöntemi ile yapılan ölçümde yani XRF yönteminde (N-x) eğrisinin özellikle yüksek konsantrasyonlu bölgesi katkı difüzyonunun yavaş bileşeni hakkında bilgi vermektedir. Bu durum iletkenlikle ölçülen duruma göre daha küçük difüzyon katsayısını vermektedir.

Termal difüzyon yöntemi kullanılarak Au ve Ag ile katkılanmış p-CdTe ince filmlerinde iletkenlik-sıcaklık, fotoiletkenlik ve optik absorpsiyon ölçümleri yapılarak katkılı yarıiletkenin enerji spektrumları incelendi. Altın ve Gümüş katkılı p tip CdTe filmin yasak enerji bandında katkı nedeni ile oluşan akseptör özellikte enerji seviyeleri optik absorpsiyon ölçümlerinden Au için $E(\text{Au}) = E_v + 0.2 \text{ eV}$, Ag için $E(\text{Ag}) = E_v + 0.09 \text{ eV}$ olarak belirlendi.

Kim vd. (1996) PICTS metodu ile CdTe yarıiletkeninde Au ve Ag katkısının ait enerji seviyesini 0,22eV olarak belirtmiştir. Scholz ve diğerleri p tip CdTe üzerinde yaptıkları DLTS ölçümünde Ag katkılı CdTe kristalinde Ag katkısından kaynaklanan 0,109eV luk seviye belirlemişlerdir. Methew (2003) birçok grup tarafından yapılan PICTs çalışmalarını derlediği makalesinde Au ve Ag katkının seviyesini $E_v + 0,2 \text{ eV}$ olarak belirtmiştir.

Kaplanan Au kalınlığının CdTe filmin elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Au kalınlığı arttıkça filmin öz direnci azalmakta, bununla birlikte yük taşıyıcıları konsantrasyonu artmıştır. Yaklaşık 3µm kalınlıktaki CdTe filme kaplanan Au kalınlığının değerine artması ile artmış, 60nm ve yukarısında ki değerlerde yük taşıyıcıları konsantrasyonu ortalama $2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ değerinde doyuma ulaşmıştır. Au metalinin p tip CdTe filmin iletkenlik tipini değiştirmedeği belirlenmiştir. Au difüzyon sürecinde p tip CdTe filmde Cd boşluklarına (V_{Cd}) yerleşmesi ile yük taşıyıcı konsantrasyonu artmıştır buna bağlı olarak filmin iletkenliği artmıştır (Zanio, 1978).

Au katkı miktarının yaklaşık iki kat artması ile çoğunluk yük taşıyıcılarının mobilitesi yaklaşık 1,2 kat azalmıştır.

Gümüş metalinin kalınlığının p tip CdTe filmlerin elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kaplanan Ag kalınlığı arttıkça p tip filmin öz direnci azalma göstermiştir bununla birlikte yük taşıyıcıları konsantrasyonu artmıştır. Öz dirençte azalma ve yük taşıyıcı konsantrasyonundaki artma 60nm Ag kalınlığından sonra $2,6 - 3,1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ aralığında doyuma ulaşmıştır. Ag atomlarının difüzyonu etkisi ile p tipi CdTe filmin direncinin azalması, Ag atomlarının Cd boşluklarına (V_{Cd}) yerleşmesi buna bağlı olarak yük taşıyıcı konsantrasyonun artması ile açıklanmıştır (Zanio, 1978) , Belas vd. (2004) tarafından p tip CdTe'ye Ag nin difüzyonunda gümüş atomları Cd boşluklarına yerleşmekte ve akseptör özelliği göstermekte olduğunu belirtmişlerdir.

Ag katkı miktarının yaklaşık iki kat artması ile çoğunluk yük taşıyıcılarının mobilitesi yaklaşık 3 kat azalmıştır.

Au/pCdTe eklemnin akım-gerilim karakteristikleri incelendi ve eklemnin omik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Eklemnin kontak direnci aydınlıkta $2,01 \text{ MOhm.cm}^{-2}$, karanlıkta $4,31 \text{ MOhm.cm}^{-2}$ olarak ölçülmüştür. Kullanılan Au ve pCdTe malzemelerini çıkış işleri ile yapılan teorik hesaplama ile oluşacak bariyerin $0,003 \text{ eV}$ olacağı ve küçük olan bu büyüklükteki bariyer yüksekliğinde eklemnin omik özellik göstereceği belirlenmiştir.

Ag/pCdTe eklemlerin I-V ve C-V karakteristikleri incelendi ve eklemnin Schottky diyot karakteri gösterdiği belirlenmiştir. A/pCdTe Schottky diyonun engel yüksekliği $0,7\text{-}0,8 \text{ eV}$, doyma akım yoğunluğu $3,7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, ideallik çarpanı $1,9\text{-}10$ ve akseptör konsantrasyonu $1,4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Eklemnin ışığa duyarlılığı zayıf olup, bu durum eklemnin Ag/CdTe sınırında rekombinasyon merkezi rolü oynayan Ag_2Te fazının oluşumu ile açıklandı.

Kullanılan Ag ve pCdTe malzemelerini çıkış işleri ile yapılan teorik hesaplamada, oluşacak bariyerin $0,66 \text{ eV}$ olacağı belirlenmiştir. Teorik olarak hesaplanan değeri ile deneysel olarak belirlenen değerin farklı olması Ag/pCdTe arayüzeyde oluşan Ag_2Te fazından kaynaklanabilir.

KAYNAKLAR

- Abdullaev, G.B., Dzhaferov, T.D. (1987), "Atomic diffusion in Semiconductor Structures", Harwood Academic, New York.
- Akimoto, K., Okuyama, H., Ikeda, M., ve Mori, Y., (1992), "Oxygen doping in CdTe, CdS, and ZnS", Journal of Crystal Growth 117, 420–423.
- Al-Shibani, K. M., (2002), "Effect of isothermal annealing on CdTe and the study of electrical properties of Au-CdTe Schottky barriers, Physica B, 322, 390-396.
- Altosaar, M., Kukk, P.E., Mellikov, E., (2000), "Point defects in Cl and Na doped CdTe monograin powders", Thin Solid Films, 361-362, 443-445.
- Baier, N., Brambilla, A., Feuillet, G., Renet, S., (2006), "Photo-induced Current Transient spectroscopy studies on polycrystalline CdTe", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 563, 155-158.
- Baker, H., (1999) , "ASM Handbook" "Alloy Phase Diagrams", Volume3, ASM international, third printing, USA.
- Basol, B. M., (1992), "Processing High Efficiency CdTe Solar Cells", International Journal of Solar Energy 12, 25-35 .
- Batzner, D. L., (2001), "Development of efficient and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells", Thin Solid Films 387, 151-154.
- Bhattacharya, P., (1997), Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall, USA.
- Birkmire, R.W., (2001), "Compound polycrystalline solar cells: Recent progress and Y2K perspective", Sol.EnergyMater. Sol. Cells, 65(1),17-28,
- B. I. Boltaks, (1960), Diffusion in Semiconductors, Academic Press, New York.
- Belas, E., Moravec, P., Gril, R., Franc, J., Toth, A.L., Sitter, H., Höschl, P., (2004), "Silver diffusion in p-type CdTe and (CdZnTe) near room temperature", phys.stat.sol. (c) 1, No. 4, 929-932.
- Cafer, T., (2000), Katihal Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Caferov, T., (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Chandramohan, S., Sathyamoorthy, R., Lalitha, S., Senthilarasu, S., (2006), "Structural properties of CdTe thin films on different substrates", Solar Energy Materials and Solar Cells, 90, 686-693.
- Chopra, K., (1983), Thin film Solar Cells, Plenum Press, USA.
- Chopra, K., (1969), Thin Film Phenomena, McGraw-Hill Book Company, USA.
- Chou, H. C., Rohatgi, A., (1994), "The impact of MOCVD growth ambient on carrier transport, defects and performance of CdTe/CdS heterojunction solar cells", Journal of Electronic Materials, 23, 1-7.
- Cullity B.D., Stock, S.R., (2001), Elements of X-Ray diffraction, Prentice Hall, USA.

- Dharmadasa, I. M., Mclean, A. B., Patterson M.H. and Williams, R. H., (1987), "Schottky barriers and interface reactions on chemically etched n-CdTe crystals", *Semicond. Sci. Technol.* 2, 404-412.
- Dhere, R. G., (1996), "Intermixing at the CdS/CdTe Interface and its effect on device performance", *Material Research Society Symposia Poceedings: Symposium J, MRS Meeting 1996, San Francisco CA.*
- Dzhafarov, T.D., Yesilkaya, S.S., Yilmaz Canli, N., Caliskan, M., (2004), "Diffusion and Influence of Cu on Properties of CdTe Thin Films and CdTe/CdS Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004.
- Dzhafarov, T.D. (1991), "Radiation Stimulated Diffusion in Semiconductors", *Energoatomizdat, Moscow.*
- Dzhafarov, T.D. (2005), "Photostimulated Changes of Electrical Characteristics of Ag/CdTe Thin film Structures", *Material Research Society, Symp. Proc. Vol. 865, Warrendale, PA, 2005*, F.5.13 .
- Dzhafarov, T.D., Caliskan, M., Cıngı, E. (2005), "Electrical and optical Characteristics of Ag/CdTe Thin Film Structures", *Azerbaycan Milli İlimler Akademisi, Proceeding, Baku .*
- Herrmann, K.H., Rakhshani, A.E., Alshamary, L., (1999), "Some properties of Au/n-CdTe Schottky barriers as established by I-V characteristics and photocurrent spectroscopy", *Solid-State Electronics*, 43, 1251-1258.
- Hage-Ali, M., Siffer, P. in : Schlesinger, T.E., James, R.B. (1955), *Semiconductors and Semimetals*, vol.43, Academic Pres, San Diego, pp.912-334.
- Hsu, T. M., Jih, R. J., (1986), "Oxygen doping in close-spaced-sublimed CdTe thin films for photovoltaic cells", *Journal of Applied Physics*, 59, 3607-3609.
- Jensen, G., (1997), "Alloys in Cadmium Telluride Solar Cells", *Stanford Üniversitesi Doktora Tezi*, UMI: 9723374.
- Kabak, M., (2004), *X-Işınları Kristalografisi, Bıçaklar Kitabevi, Ankara.*
- Kim, M.D., Kang, T.W., Kim, T.W., (1996) "Hydrogenation behavior of deep levels in nominally undoped p-CdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy" *Solid State Commun.* 99, 177
- Kittel, C., (1986), *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons, New York, USA
- Kumar, S., Sharma, S.K., Sharma, T.P., Husain, M.,(2000), "CdTe photovoltaic sintered films", *Journal of Physics and Chemistry of solids*, 61, 1809-1813.
- Lide, D. R., (2005), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC pres,
- Lee, Jae-Hyeong., Lim, Dong-Gun., Yi, Jun-Sin.,(2003), " Electrical and optical properties of CdTe films by vacuum evaporation with close spacing between source and substrate", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75, 235-242.
- Lyubomirski, I., Lyakhovitskaya, V., Triboulet, R., Cahen, D. (1997). Substitutional-Interstitial Silver Diffusion and Drift in Bulk (Cadmium,Mercury)Telluride: Results and Mechanistic Implications, *J. Electron Mater.*, 26, 97-105

- Luque, A., Hegedus, S., (2003), Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ,Wiley
- Lyakhovitskaya, V., Chernyak, L., Greenberg, J., Kaplan, L., Cahen, D., (2000), “n- and p-type post-growth self-doping of CdTe single crystals”, Journal of Crystal Growth 214/215, 1155-1157.
- Markvart, T., Castaner, L., (2003), Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Application, Elsevier.
- Mathew, X., (2003), “Photo-induced current transient spectroscopic study of the traps in CdTe”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 76, 225-242,
- Mathew, X., Sebasitan, P.J. Sanchez, A., Campos, J., (1999), “Structural and opto-electronic properties of electrodeposited CdTe on stainless steel foil”, Solar Energy Materials and Solar Cells 59, 99-114.
- Mathew, X., Enriques, J. P., (2000), “Temperature dependence of the optical transitions in CdTe thin film- Inverstigation with photoresponse spectra”, 63, 347-354.
- Mathew, X., (2003), “Opto-electronic properties of an Au/CdTe device”, Semiconductor Science and Technology, 18 (1-6).
- Mathew, X., Mathews, N.R., Sebastian, P.J., Osvaldo Flores, C., (2004), “Deep levels in the band gap of CdTe films electrodeposited from acidic bath-PICTS analysis”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 81, 397- 4005.
- McCandless, R.E., Birkmire, R. W., (1991), “Analysis of Post Deposition processing for CdTe/CdS thin film solar cells”, Solar Cells 31, 527
- Movchan, S., Sizov, F., Tetyokin, V., (1999), “Photosensitive heterostructure CdTe-PbTe prepared by hot-wall technique”, Institute of Semiconductor Physics, National Academi of Sciences of Ukraine, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, V2, N2, 84-87.
- Ongül, F., (2004), Klorlu katkıların CdTe filmlerin elektrik, fotoelektrik ve optik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, YTU.
- Pandey, S.K., Tiwari, U., Raman, R., Prakash, C., Krishna, V., Dutta.V., Zimik, K., (2005), “Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition”, Thin Solid Films, 473, 54-57.
- Pankove, J.I., (1971), Optical Processes in Semiconductors, Dover Publication, New York
- Rakhshani, A. E., (1998), “Charge Transport Mechanisms in Au-CdTe Schottky diodes”, Phys. Stat. Sol. (a) 168, 177
- Rei, F., (1994), “Thermodynamic properties of nonstoichiometric cadmium telluride and defect chemistry analysis”, Doktora tezi, UMI 9517925, Marquette University.
- Rhoderic, E.H., (1980), Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford
- Roussillon, Y., (2004), “ From front contact to back contact in CdTe/CdS Solar Cells: Buffer layer and interfacial layer”, PhD. The University of Toledo, USA
- Runyan, W.R.,(1975),Semiconductor Measurements and Instrumentation, McGraw-Hill Book

Company, USA.

Scholz, K., Stiens, H., Müller-Vogt, G., (1999), "Investigations on the effect of contacts on p-type CdTe DLTS-measurements", *Journal of Crystal Growth*, 197, 586-592.

Sharp, P.R., (1990), "Ion Assisted doping of p-type Cadmium Telluride Thin Films", Ph.D, Stanford University, Order number 9102346.

Shur, M., (1996), *Introduction to Electronic Devices*, John Wiley & Sons, Inc., USA

Singh, J., (1995), *Semiconductor Optoelectronics*, McGraw-Hill, Inc., USA.

Sochinskii, N.V., Lazano, M., Pellegrini, G., Ullan, M., (Basimda), "Simulation of CdTe:Ge crystal properties for nuclear radiation detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006 Elsevier,.

Streetman, B. G., and Banerjee, S., (1972), *Solid State Electronic Devices*, Prentice Hall, USA.

Sze, S. M., (1981), *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Wang, S., (1989), *Fundamentals of Semiconductor Theory and Device physics*, Prentice Hall, USA.

Wartlick, B.O., Blanchhard, C., Bardot, J.F., (2000), "Study of silver and copper diffusion in p-type $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ and CdTe by capacitance measurements", *Materials Science and Engineering B*, 71, 254-257.

Webster, J. G., (1999), *Measurement, instrumentation and sensors handbook*, CRCnetBase, CRC Pres.

Viswanathan, V., (2004), "Study of Cu Free Back Contacts to Thin Films CdTe Solar Cells", *Doktora Tezi*, University of South Florida, USA.

Zanio, K., (1978), *Semiconductors and Semimetals Volume13-Cadmium Telluride*, Academic Press, New York, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	12-10-1970	
Doğum teri	Suşehir/Sivas	
Lise	1986-1988	Beylerbeyi Lisesi
Lisans	1990-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
Doktora	2002-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
Çalıştığı Kurum :	1997-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü